



TITLE:

街路網における信号機のオフセット最適化に関する基礎的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

奥谷, 巖

CITATION:

奥谷, 巖. 街路網における信号機のオフセット最適化に関する基礎的研究. 京都大学, 1973, 工学博士

ISSUE DATE:

1973-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r2207>

RIGHT:

街路網における信号機のオフセット
最適化に関する基礎的研究

昭和47年7月

奥　　谷　　巖

目 次

序

第1章	緒論	1
1.1	信号最適化の意義	1
1.2	従来の研究	3
1.3	本研究の目的および内容	9
第2章	信号制御の評価規準とその基本的特性	11
2.1	概説	11
2.2	評価規準の種類	11
2.3	数式モデルによる検討	13
2.4	シミュレーションによる検討	42
2.5	オフセット変化による交通損失の観測例	62
2.6	結語	66
第3章	路線系統を基盤とした制御	69
3.1	概説	69
3.2	動的計画法を用いたスループット最大化の手法	70
3.3	交通損失最小化の手法	90
3.4	車群の再編成をねらったオフセット設定法	104
3.5	ツリー形成による制御	111
3.6	結語	127
第4章	街路網を構成するループの信号最適化	131
4.1	概説	131

4.2	動的計画法を用いたスルーバンド最大化の手法	-----	133
4.3	動的計画法を用いた総損失最小化の手法	-----	139
4.4	離散型最大原理を用いた総損失最小化の手法	-----	153
4.5	傾斜法を用いた総損失最小化の手法	-----	168
4.6	ラグランジュの未定乗数法を用いた総損失最小化の 手法	-----	174
4.7	各手法の比較	-----	178
4.8	結語	-----	182
第5章	各種制御方式の比較検討	-----	184
5.1	概説	-----	184
5.2	計算例による上記各種制御方式の比較検討	---	184
5.3	制御システムの構成	-----	200
5.4	結語	-----	221
第6章	結論	-----	224
参 考 文 献			

序

大都市の交通混雑は激化の一途をたどっているが、この緩和を図る一方法として、一連の信号機の信号表示に関連づけを行なって制御を行なうという系統制御の考え方がある。この系統制御を二次元的広がりをもつ街路網について考えたとき、それを面制御とよんでいる。

本研究は、この面制御におけるオフセット設定の問題について、基礎的な検討を行なったもので、ここに述べられたことがそのまま実際の問題に適用できるものではない。しかしながら、本研究が街路網の信号制御システムを考える上で、なんらかの手掛りを与えるならば望外の幸いである。

最後に、本研究をまとめるにあたり直接御指導を賜った京都大学佐佐木綱教授に対し、心から感謝の意を表するとともに、終始御鞭撻をいただいた京都大学石原藤次郎名誉教授、同米谷栄二教授、信州大学長尚教授に対し、衷心より御礼申し上げる次第である。また、大阪都心部広域交通制御システム研究委員会の各位ならびに京都大学の米谷・佐佐木両研究室の諸氏には御討議、御協力いただいたことに対し、感謝致します。さらに、末尾ながら信州大学佐田正直助手には、論文清書にあたって全面的な御協力をいただいた。ここに特記して深謝の意を表する次第である。

昭和47年7月

奥谷 巖

第1章 緒論

1.1 信号制御最適化の意義

平面交差点においては、複数方向の道路から流入してくる自動車は同一空間を利用するため、同一時点に流入を欲する車は、一方が他方に優先通行を認めない限り、一般には通行が困難であり、衝突という危険な事態を招来することにもなる。そこで、どちらかの方向を優先させて通行させる道路標識が必要となったのである。たとえば、一旦停止等の規制を行なって、人間の注意力を補佐する機能を与えた。ところが、このような道路標識のみでは、事故防止の観点からは不完全であることが明らかとなり、ここに交通信号機の出現を見ることになった。

以上のような経緯からして、おそらく信号機が現われ初めの段階（交通量があまり多くない時代）では、その機能は交通事故防止に最大の重点が置かれることは首肯するに難くないと思われる。しかしながら、交通量がある限度を越えて多くなってくると、交通事故防止の機能に加えて、流入交通需要の処理効率の向上が問題となり、この時点ではじめて交通信号機を制御するという概念が生まれてきたのである。

このような交通信号機の制御も、信号機数が少なく、かつそれら相互間の距離が十分に離れている場合には、おのおのの交差点で独立に行なわれ、いわゆる交通感應式信号機はこうした制御の効率化の過程において生れた。

しかしながら、現在の大都市において見られる如く、街路網のほとんどの交差点に信号機が設置されてくると、おのおのの交差点に流入する交通は周辺にある交差点の信号制御に影響されることから、各交差点において独立した形式の信号制

御を行なうことのみでは不十分であって、隣接する交差点の信号制御相互間に、ある種の関連を持たせた方が交通処理上より効率的となるのではないかという考え方が生じてきた。このことを裏づける興味ある例として、イギリスのロンドンにおける例を挙げることができる。ここでは当初、街路網の信号制御を行なう方法として、各交差点の信号機をすべて交通感应式信号機にするという方法を取り、それで十分であると考えた。事実、交通量が少ない段階ではかなりの成果をおさめた。しかしながら、その後、すべての街路上における交通量が多くなってきたために、結果的に各信号機は毎周期最大青信号時間を表示して、定周期信号機と何ら変わらないということになり、交通感应式信号機の効果が減殺されたのである。

一方、ドイツ連邦では系統制御を中心とした制御が採用されてきており、ここに両者の利点を組み合わせる形での制御が考えられるようになってきたのである。

すなわち、イギリスでは各交差点の独立した制御により、街路網全体の制御を行なおうとしたのに対し、ドイツ連邦では路線系統制御の集まりとして、街路網の信号制御を図ろうとしたのである。

いま、街路網を後者すなわちドイツ連邦的考え方にたつ路線から構成されているものとする、その信号制御の最適化ということとは、こうして系統制御を最も合理的に行なうことで、具体的には各信号機の3つの制御パラメーターを、相互の関連を考慮しつつ、与えられた評価規準を最も好ましくするように設定するということであるといえよう。これらの3つの制御パラメーターのうち、とくに隣接交差点相互間の青信

号のタイミングを意味するオフセットの設定は重要であり、その最適化は信号系統制御の効率向上の主要な部分を占めるのである。このような意味で、本研究は街路網の信号機のオフセット最適化をその内容とする。

1.2 従来の研究

本節では、これまでに行なわれた系統信号制御の分野における研究について、その概略を述べておく。ここでは、とくにオフセット最適化のために、非常に大きな役割りを果す(1)交通損失および車群パターンに関する研究 (2)路線におけるオフセットづけに関する研究 (3)網におけるオフセットづけに関する研究 の3つの部分に分けて述べることにする。

1.2.1. 交通損失および車群パターン

信号交差点に到着した車は、いかなる損失を受けるか、あるいは信号交差点から流出した一連の車すなわち車群の形は時間の経過とともにどのように変形してゆくかという問題は、系統信号制御を行なう上で極めて基本的である。

1941年に Clayton¹⁾ は簡単なモデルを用いて信号交差点で発生する待ち時間の算定式を示すとともに、交通感應式信号交差点に車がランダム到着するという仮定のもとに平均待ち時間がどのようにして求められるかという研究を行なっている。後者の交通感應式信号交差点の問題については、その後非常に多くの研究発表が行なわれたが、その中で主なものを挙げれば Tanner²⁾, Darroch, Morris and Newell³⁾ がある。

Tanner の論文では片側一車線、二方通行の場合の待ち時間算定法が示されており、Darroch 他 の論文は記号の定義を変え、かつ内容的に若干の変更を加えることにより、Tanner の

論文とはほぼ同一となる。Grace, Morris, and Pak-Poy⁴⁾らは流体的モデルを導入して上述の問題の近似解法を展開した。Dunne and Potts⁵⁾ および Dunne⁶⁾ は車の到着を二項分布と仮定し、現示に関連づけて行列長の確率母関数その他を求めたが、その後 Dunne⁷⁾ は同じ仮定から待ち時間を求める式を提案した。

定周期信号交差点での交通損失については、やはり多くの研究がなされており、主なものとしては、J. C. Wardrop⁸⁾, M. Beckmann, C. B. McGuire, and C. B. Wisten⁹⁾, G. F. Newell¹⁰⁾, F. V. Webster¹¹⁾ および T. Uematsu¹²⁾ などがある。これらの研究においては、いずれも車の到着時間がある定常確率過程を形成するものと仮定され、待ち時間を理論的に求める方法が展開されている。

一方、信号交差点を通過した車群パターンの研究であるが、これは上に述べたような信号交差点で発生する交通損失を求める際に重要な意味をもつ問題であって、直接系統制御に係する。

Lighthill and Whitham¹³⁾ は流体力学を応用して交差点を流出した車群の衝撃波の伝播過程を明らかにした。Foster¹⁴⁾ はその後、やはり流体力学を用いて車群の変形状態について分析している。Gerlough¹⁵⁾ は別個に、交通動学と波動力学のアナロジーから、車群の拡散現象を表現しようとしたが、必ずしも満足のゆく結果を得られなかったようである。

実験を主体とした研究としては、Lewis¹⁶⁾ あるいは Graham and Chenu¹⁷⁾ らの研究があるが、彼らはその中で、車群が交差点を離れるにしたがって、どのように変形してゆくかについての克明なデータ分析を示している。

Pacey¹⁸⁾ の研究は、実験と理論を組み合わせたものであり、

最も注目に値する。彼は車群の拡散を表現するために、純粋の運動力学を応用している。おのおのの車の速度は車群中の位置に無関係であるとの仮定のもとに、正規分布を速度分布に適用し、車群の広がりや車群の速度分布に関連づけて理論的解析を行なっている。上述の仮定は一見非現実的ではあるが、幹線街路の2地点で車群パターンを実測した一連の実験結果では、彼の理論が中程度の交通量に対してよく実現象に適合することが示された。この理論を2つの信号間の系統制御に実際に適用した例として Helm¹⁹⁾の研究がある。彼は速度分布に矩形あるいは台形分布を採用し、問題を簡単化している。また、M. J. Grace and R. B. Potts²⁰⁾は Pacey と同様に速度分布を正規分布と仮定し、理論を一步進めることに成功した。さらに彼らはその理論の2交差点間の系統制御への適用を試みている。

G. F. Newell²¹⁾は Pacey らの研究においては一連の交差点を連続的に通過してゆく過程が欠如しているとして、複数交差点を対象にその中で発生する車の待ち時間を求める研究を行なった。しかしながら、この研究は交通量がそれほど多くない場合を前提としていた。

これに対して、彼²²⁾は交通量が多々多い場合には、ある交差点で発生する交通損失はその交差点のオフセットと一つ上流側の交差点のオフセットのみによって決定されるとして、それらの交差点間の走行所要時間およびスプリットのいろいろな場合について、停止回数、待ち時間の算定を行なっている。

一方、R. E. Allsop^{23), 24)}の研究は特徴的である。まず、文献23)においては、待ち時間を車群のパターンと車群の長さお

よび先頭車の到着時刻の三つの量で表わし、先頭車の到着時刻が一定である場合には、車の到着間隔の若干の変化は常に平均待ち時間を増大させることおよび車群の長さの若干の変化は、条件に応じて平均待ち時間を減少あるいは増大させるということの二つの結論を導いている。なお、待ち時間の算定式は、前述の F. V. Webster¹¹⁾ の式に導いている。また、文献 24) においては、同じく Webster の式を基礎に車の到着率および飽和流の誤差（交通損失を算定するために用いた値と実際の値の差）が、制御パラメーターに及ぼす影響について検討している。結論は、交通量が極めて多い場合を除いては、到着率あるいは飽和流単独ではその誤差はそれほど敏感には待ち時間に影響しないが、それらの誤差が重なり合ったときには、影響は極めて大きいということである。彼はこの研究は交通管制の技術者をして、交通情報の精度がいかなる場合にどの程度要求されるかということおよびある制御パラメーターの設定値の有効な範囲はどのくらいであるかということを認識させるのに貢献するであろうことを予想している。

1.2.2 路線を対象としたオフセット設定

いわゆる路線系統制御の問題であるが、この分野の研究はかなり歴史が古く、1920年代にいくつかの手法²⁵⁾が提案されている。1930年代の初めのころにスループバンドの概念とその計算方法を示した研究が発表された。²⁶⁾その後このスループバンドを規準とした路線のオフセットづけの問題に関しては数多くの研究が行なわれたが、主なものとしては Fieser, Morgan and Little²⁷⁾、高田・栗本²⁸⁾、越²⁹⁾らの論文が挙げられる。

Fieser の方法は、系統速度が一様で上り下りとも同じ、信号間隔とスプリットは等しくなくてもよいという条件のもと

で、実用範囲での最適サイクル長とオフセットを求めることができる。しかし、厳密には特別の場合の理論的最適解を見逃すことがある。それは、スプリットの不整によるオフセット補正の方法から生じてくるもので、スプリットがすべて等しい場合であれば常に最適解が得られる。Morgan and Littleの方法は、系統速度は一樣でなく、上り下りも等しくない信号間隔とスプリット不整という一般的条件のもとで与えられたサイクルについてオフセットの最適解を与える。したがって、サイクルの最適値は求められない。また、計算手段としては電子計算機を用いることを前提としている。高田・栗本の方法は、系統速度は一樣ではないが上り下りについては等しい、信号間隔およびスプリットは不整という条件のもとで与えられたサイクルについてオフセットの最適解を与える。越の方法は、系統速度は一樣でなく上り下りも等しくない、信号間隔およびスプリットも不整という一般的条件のもとで、最適サイクルと最適オフセットを与える。また、実用的な計算法として図式解法を示している。

このようなスループット最大概念に対して、待ち時間をはじめとする交通損失を規準とした路線系統の考え方があつた。これはスループットの考え方の中には、車の待ち行列とか、交通量といった要素がまったくないという反省³⁰⁾からでてきたものである。

E. Bavaréz and G. F. Newell³¹⁾は一方通行下の路線にたいし、走行速度が一定、最初の交差点への車の到着が定常確率過程に従かうという2つの前提にたつて、路線内で発生する総待ち時間あるいは総停止回数を最小にするオフセットパターンを求める方法を示している。最小化の数学的手法は微分法で

ある。この方法によればスループバンドを最大にするオフセットを求めることもできる。尾崎・遠藤³²⁾は到着、発進ともに飽和流のみの方形波モデルを与え、余裕度なる量（これは交通損失のうらがえしと解される）を導入し、余裕度が最大となるような平等および優先オフセットの適用範囲について論じた。猪瀬・藤崎・浜田^{33), 34)}は到着、発進ともに一様な方形波モデルを与え、遅れを最小とするオフセットとは交通量の多い方向の優先オフセットであるという結論を導いている。

1.2.3 網におけるオフセットづけ

ループを含む街路網のオフセットづけの問題は、オフセットのループに沿った実現条件を考慮する必要があるかなり複雑である。

J.D.C. Little³⁵⁾は網全体のスループバンドを最大にするオフセットパターンの決定方法について、混合整数線形計画法を用いたものを開発した。主な仮定は、各交差点の周期が共通であること、スプリットが与えられていることおよび各街路区間における走行速度がわかっていることの3つである。彼はこの問題の実際的な計算法としてブランチ・アンド・バウンディング法を適用している。J.A. Hillier³⁶⁾は、これにたいして網全体の総待ち時間を最小にするオフセットパターンについて、ダイナミックスプログラミングを応用した決定手法を開発させたが、この方法がいわゆる組み合わせ法 (Combination Method) とよばれるもので、その後彼とWhitingによって改良され、さらにR.E. Allsop^{37), 38)}によって、より一般的な形状をした街路網にも適用できるように手が加えられた。また同じく数学的手法としてダイナミックスプログラミングを使って、網の総交通損失を最小ならしめるオフセットパターンを求める方法

を *N. Gartner*³⁹⁾ が別個に最近提案しているが、彼の方法はグラフの理論を用いて計算量をいかに減らすかということに焦点をあてており、注目に値する。

これに対して、最小化の方法としていわゆる山登り法を適用したいくつかの論文がある。すなわち、*A. Chang*⁴⁰⁾、*D. I. Robertson*⁴¹⁾あるいは越⁴²⁾などの方法である。山登り法という数学的手法の特徴でもあるわけであるが、これらの方法では、いずれも極小値が多く存在するという実際上での問題については言及していない。なお *D. I. Robertson* の方法は一般には TRANSYT 法とよばれ、実用に供されているものである。

また、上に述べたような解析的な方法にたいして、トラフィックシミュレーションを用いて街路網の信号制御の特性を調べようとする方向がある。たとえば、*S. B. Miller and J. D. C. Little*⁴³⁾、*R. Sagen*⁴⁴⁾あるいは *W. F. Schaalkwijk*⁴⁵⁾ などの研究である。こうしたシミュレーション手法を用いた街路網の信号制御の分析においては、網が大きい場合にはそのほとんどが交通流を車群ごとらえてシミュレートするというモデルを考えており、計算時間の減少を期している。

1.3 本研究の目的および内容

本研究は、街路網の信号系統制御に資するべく、信号機の3つの制御パラメータのうち、とくにオフセットに着目し、与えられた規準からみたその最適設定方法について、基礎的な観点から検討を加えることを目的としている。

全文の構成は6章から成り立っており、まず第2章で、信号制御の各種の規準を列挙するとともに、オフセットとの関連における交通損失の特性について、数式モデルとシミュレー

シヨンの両面から検討している。これはオフセット最適化の評価基準として交通損失を採った場合、それら相互間の関係を明らかにしておくことが最適化の前提となってくるためである。

第3章においては、路線系統を基盤とした信号制御におけるオフセット最適化について述べる。まず路線を対象に、スループント最大および交通損失最小の規準からみたオフセット最適化の手法を述べ、さらに車の待ち行列長を考慮したオフセット設定についても、1つの方法を示している。ついで、路線が何本か交差集合した形でのツリー状路線網を対象としたオフセット最適化について、与えられた街路網から最も制御効果の大きいツリーを形成する方法も述べる。

第4章においては、街路網にループの存在を認めた形での、網全体のスループントを最大にするオフセット設定方法と、網全体の交通損失を最小にするオフセット設定方法について言及する。ダイナミックプログラミングを用いた総損失最小化の方法については、その適用範囲を明確にした。

第5章では、第3章および第4章で示したオフセット設定の観点からみた各種信号制御方式を、小規模な街路網を対象とした計算例をとおして比較検討するとともに、それら制御方式の街路網信号制御における位置づけおよび制御モードなど、制御システムの構成について言及する。

第6章では、以上の研究から得られた主な成果ならびに今後に残された課題について述べる。

第2章 信号制御の評価規準とその基本的特性

2.1 概説

街路網の各交差点に対して、設定すべき制御パラメーターに関するいくつかの代替案がある場合に、その中から望ましいものを1つ選ぶために、判断規準の設定が必要となってくる。ここではこれを制御の評価基準とよぶ。本章ではこの評価基準について、待ち時間、停止回数等交通損失の種類を列挙し、その基本的特性にふれる。交通損失については制御パラメーター、特にオフセットとの関係を検討する。基本的特性を調らべるため、考察の対象とする街路は、路線上の2ないし3交差点とし、数式モデルとシミュレーションの両面から考察する。とくに、シミュレーションによる検討では、街路区間相互の交通損失の独立性(ある街路区間で発生する交通損失はその両端交差点の信号制御政策にのみ従属して決まり、その他のあらゆる交差点の制御政策には独立であるということ)の検証に主眼がおかれる。これはもしこの性質が成り立つならば次章以降での解析が非常に容易になるということに基づいている。シミュレーションは、2つの異なるモデル、すなわち車を集団として扱かう流体的モデルと1台1台個別的に取扱かう追従理論モデルについて実施される。

2.2 評価規準の種類

2.2.1 待ち時間

車が停止を余儀なくされている時間のことであり、赤信号によるもの、青信号での発進遅れによるもの、右折または左折待ちによるもの、その他、バスまたはタクシーの停車によるものなど、原因はいろいろ考えられるが、信号制御に特に

関連するものとしては最初の2つを挙げる事ができよう。この量は現在までの時点では、最も多く信号制御の評価基準として用いられているが、直接、現場で計測することが困難なため、ほとんどの場合は数式あるいはシミュレーションなどを使って算定し評価している。

2.2.2 停止回数

車が停止した回数であり、停止した時間長さを問題としない点、待ち時間などの量とは根本的に異なっている。これが評価基準となり得る根拠は、運転者はしばしば待つあるいはノロノロ走ることよりも停止するということ自体を嫌う傾向があるところに存する。スループット最大の制御は、正にこの停止回数の減少を期待する制御と言えよう。しかしながら、この量を評価基準として使い得るのは、一般的には交通量が少ない場合であると言われている。これは交通量が多い場合には、上にも述べたように停止回数だけではノロノロ運転等交通の実状を必ずしも忠実に反映しないという事実に基づいている。

2.2.3 行列長

信号交差点での待ち行列の長さを意味するが正確に定義することは困難である。なぜならば、交差点の停止線から連続して停止している車の延べ長さということであれば、赤信号が終った直後の行列長ということになり、また、とにかく赤信号の影響で停止した最後の車の位置をさすのであれば、青信号が始ってからの状況をも見て判断しなければならないが、この場合にはすでに前方の車は走行を開始していて、行列の概念とは若干異なってくるというように、一概に決めにくい要素を有しているからである。

しかしながら、交通混雑が深刻な場合には、下流側交差点で生じた行列が上流側の隣接交差点まで及んで、その交差点を閉塞し、いわゆる交通麻痺を惹き起こすので、そのような交通状況下の制御に対しては有効な評価規準となり得る可能性がある。

2.2.4 台キロ

単位時間あたりの（自動車台数×走行距離）によって、制御の効率を表わそうとするわけであるが、局地的な一つの幹線街路に限定した場合には、この量は制御効率と比例し、これに対し、たとえば都市域全体というような広い地域を対象とした場合には、むしろ逆比例の関係になるというあいまいな点があって、実際の制御に導入することはかなり困難であることが予想される。制御方式の変化に伴う配分交通量の変化が、ある程度の精度をもって推定できる理論が開発された時点では、興味ある評価規準になるであろう。

2.2.5 走行速度

走行速度も交通状況を示す有用な情報であるから、制御の評価基準として用い得る可能性はあるが、時間的な平均の方法がむずかしいと考えられることや、交通量的なものを単独では加味することができないということなどから、むしろ制御情報として用いられており、実際に評価規準として採用された例はない。

2.2.6 走行所要時間

車が発生してから、目的地にたどりつくまでに要する時間、あるいは局部的に解釈して、交差点間の所要時間を意味するとしてもよい。走行所要時間の中には、意味的に考えて待ち時間や緩速走行など、かなりの量を含み得るし、もとより車

の走行目的は目的地により早く到着することであるから、評価規準としては、本来的には最も望ましい量であると言えよう。

2.2.7 スループバンド

日本語では連続通過帯幅とよばれるもので、一連の交差点を停止することなく通過し得る青信号の時間長さを意味する。すなわち、図-2.2.1において、横軸を時間、縦軸を距離とし、3個の交差点の

信号現示を図のように記したとき、これら3つの信号交差点を連続して通過し得る時間長さは b となるが、これがとりも直さずスループバンドなのである。これは前章でもふれたが、系統制御の概念がでてきた当初に、世界

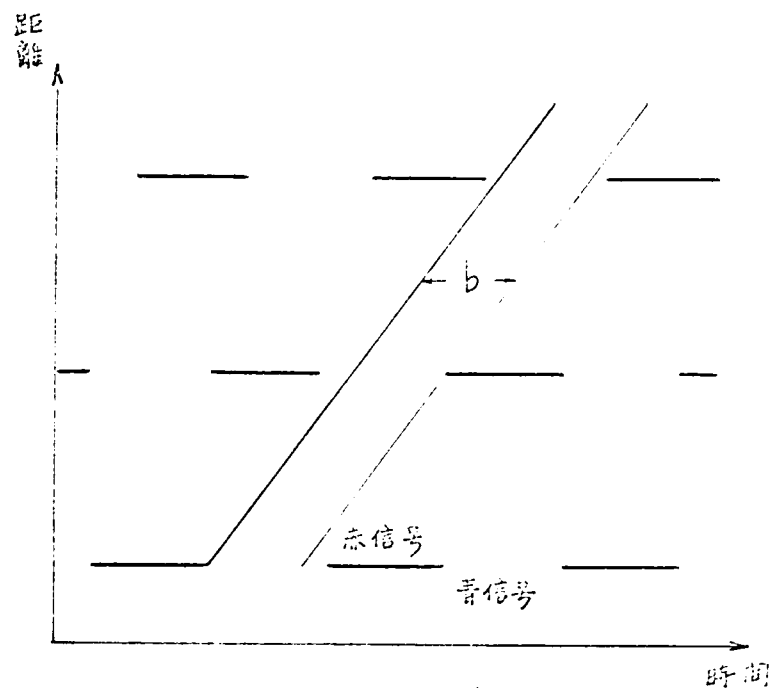


図-2.2.1 スループバンドの図式

的に広く用いられた評価規準である。しかしながら、の中には待ち行列の形成あるいは交通需要というような要素がまったく含まれていないために、現在では交通量が非常に少ない場合を除いては、ほとんど用いられていないか、用いられていたとしても、現場で必ず調整するという手順が踏まれている。

2.2.8 青時間利用率

これは青信号時間のうち、車が連続して流れた時間の割合

いで、青信号ができるだけ有効に使われるようにという発想から生じてきた概念である。この評価規準の要求に最もよく答えるシステムとして、交通感应式信号機があるが、英国における実際的な経験からすると、これは単独交差点としての交通処理には効力を発揮するものの、交差点群の系統的制御に対してはむしろ非効率であることがわかっており、このようなことからすると、青時間利用率というのは補助的な意味においてしか、評価基準になり得ないと考えられる。

2.2.9 交通事故

大阪市都心部幹線街路の南北方向に一方通行規制が敷かれてから20日間の統計資料によると、交通事故発生件数が二方通行時に比べ50%減少したが、これは一方通行規制による交差点での交通流れの衝突点数の減少が大きく貢献していることもさることながら、信号の系統制御が効率的に作動し得るようになったことも決して見逃すわけにはゆかない。このことを裏かきするものとして西ロンドンでの実験資料⁴⁶⁾がある。すなわち、計算機による信号制御を行なう実験地区とこの地区に似かよった比較地区との間で、制御前後の交通事故発生件数を比較検討したもので、これによると実験地区の事故は比較地区が4%増えた間に14%減少し(表-2.2.1参照)、歩行者事故だけについてみると、比較地区が20%増えたのに対し、実験地区は5%減少した(表-2.2.2参照)。

表-2.2.1 全日通事故の前後比較

	実験地区	比較地区
前(件)	1,871	3,543
後(件)	1,606	3,696
増減率(%)	-14.2	+4.3

表-2.2.2 歩行者事故の前後比較

	実験地区	比較地区
前(件)	409	220
後(件)	390	263
増減率(%)	-5	+20

このようなことからしても、交通事故は制御の評価規準となり得る可能性があるが、制御パラメーターと結びつけた定量評価が明らかに困難であると考えられるので、現実の信号制御で用いることは不可能に近いであろう。

2.2.10 その他

最近の社会問題である公害に関連したものとして、自動車の排気ガスによる大気汚染あるいは騒音などが考えられるが、これらの量は必ずしも制御の効率とは直接関係しない面もあり、またあいまいな点が多いので、実際場面での採用はむずかしいであろう。

上述のような種々の評価規準はおのこの単独でも、制御効率を表わし得ると考えられるが、場合によっては2つまたはそれ以上の量を複合した形での規準も考え得る。

さて、最後に2.2.1～2.2.10に掲げた評価規準を総合的に眺めてみる。待ち時間あるいは停止回数などの量は、車を極端にゆっくり走行させることによって、極めて小さくし得、またスループントも同様にして極めて大きくし得るので、この1つの反例によって、これらの量が普遍的に合理的な評価規準であることは否定される。

先にも述べたが、車の本来の目的は目的地により早く到達することであるから、個個人の心理分析は別として、やはり最も客観性があり、かつ合理性がある評価規準は走行所要時間であろう。したがって、上述の待ち時間等の量は、交通状態によってこの走行所要時間なる量を代替または近似するときのみ、その採用が認められるものと思われる。また、走行速度などの量はもとより走行所要時間的意味をもっていると考えられる。

ところで、待ち行列の後端が隣接交差点に及ぶような特に混雑が激しい状況下では、従来、評価規準として行列長あるいは青時間利用率などが提案されているが、かかる場合においても、たとえば待ち行列の長さをある限度以上にしないなどの条件を付加することによって、やはり走行所要時間であっていけない理由はない。走行所要時間と青時間利用率あるいは行列長はまったく別のものであり、別の交通状態のときに用いる評価規準であるというような割り切った考え方は、この意味においても、また、交通状態はもとより連続しているということを考えても、誤った考え方であるといわなければならぬ。

問題は、この走行所要時間という量をいかなる交通状態の下においても、技術的に評価可能にするかということであって、もし、それがどうしても不可能であるというときに初めて、他の量をもって走行所要時間の代用とするという考え方がでてくるのである。

ところで、走行所要時間を評価規準とする場合に最も注意すべきことは、現在ある街路を流れている交通は、必ずしも本来そこを流れるにいと希望して流れているのではないということ、こうした観点にたつて、制御システムを考えるときには、予めOD交通量を最短経路に近い形で配分し、その結果現れる各街路の交通量で、その街路のウェイトづけをしておくことが肝要であろう。このような考え方をすることによって、走行所要時間なる評価規準は台キロというような規準をも包括することになる。

なお、交通事故件数という量は、制御システムを設計する段階で、予め定量的に把握できるものではなく、この意味で

今までに述べた種々の量とは本質的にその性格を異にしており、制御システムの評価規準としては不適である。これはむしろ事後的な制御の副次的効果として評価すべきものであろう。

2.3 数式モデルによる検討

2.3.1 信号交差点を通過した交通量の波形

信号交差点を通過した交通は、一般に車群を形成し、下流側交差点への流入交通となるが、そこで発生する交通損失について検討するためには、車群の波形がどのようなものかを把握しておくことが必要である。そこで、以下において京都市郊外で行なわれた車群波形の調査結果（立石電気中央研究所調査）について述べることにする。

調査は、国道9号線の京都市内流入部である光華女子学園前交差点付近で行なわれた。調査方法としては、車群の伝播特性を調査するため、交差点間距離が長く、その間にまったく流入のない区間を対象に、交差点の流出口とそこから数百メートル離れた数地点において、同時に5秒間交通量の測定が行なわれた。

測定地点の位置関係は図-2.3.1 に示したとおりである。また、図-2.3.2 には信号現示を示した。

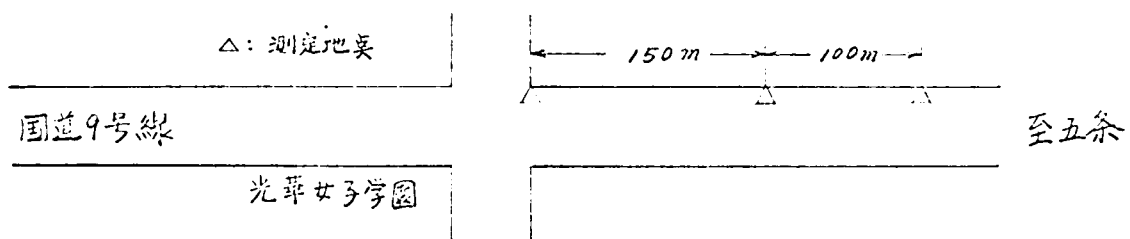


図-2.3.1 測定地点の位置

調査結果は図-2.3.3 のようになり、これを見ると実線で示した測定値はかなり不規則であり、これらの測定地点による相異を読みとること

周期 73秒		
青	黄	赤
41 秒	4 秒	28 秒

図-2.3.2 信号現示

はむずかしいが、30分間の平均値で比較してみると明らかな傾向がみられる。すなわち、交差点流出部では右左折車の影響と思われる小さな波が大きな波の間に存在するか、150m地点、250m地点と交差点から離れるにしたがって、その波が消滅している事実で、250m地点ではほとんど右左折車の影響は見られない。これは右左折車があまり多くないことから、その小車群の中では車は比較的自由に走行でき、その結果速度の速い車は前方の大車群に追いつき、逆に速度の遅い車は後方の大車群に追いつかれ、全体としては1つの車群が時間的な変動を示しながら通り過ぎていくという結果になったものと推察される。

2.3.2 数式モデル

上で検討した結果より、ある交差点に到着する車群波形は平均値的にみた場合にはほとんど定形と考えられるので、このような場合における交通損失の算定方法について考察してみよう。

いま、 a 、 b 2つの交差点を考え、 b 交差点を流出してきた交通流量(q)が a 交差点で被る損失について考える。そのために、まず下記のような文字を定義する。

L : 交差点 a b 間の距離

θ : 交差点 a b 間の相対オフセットで、詳細には交差点 a の絶対オフセット(交差点 a の青信号開始時刻)から、交差点 b の絶対オフセットを差し引いた値

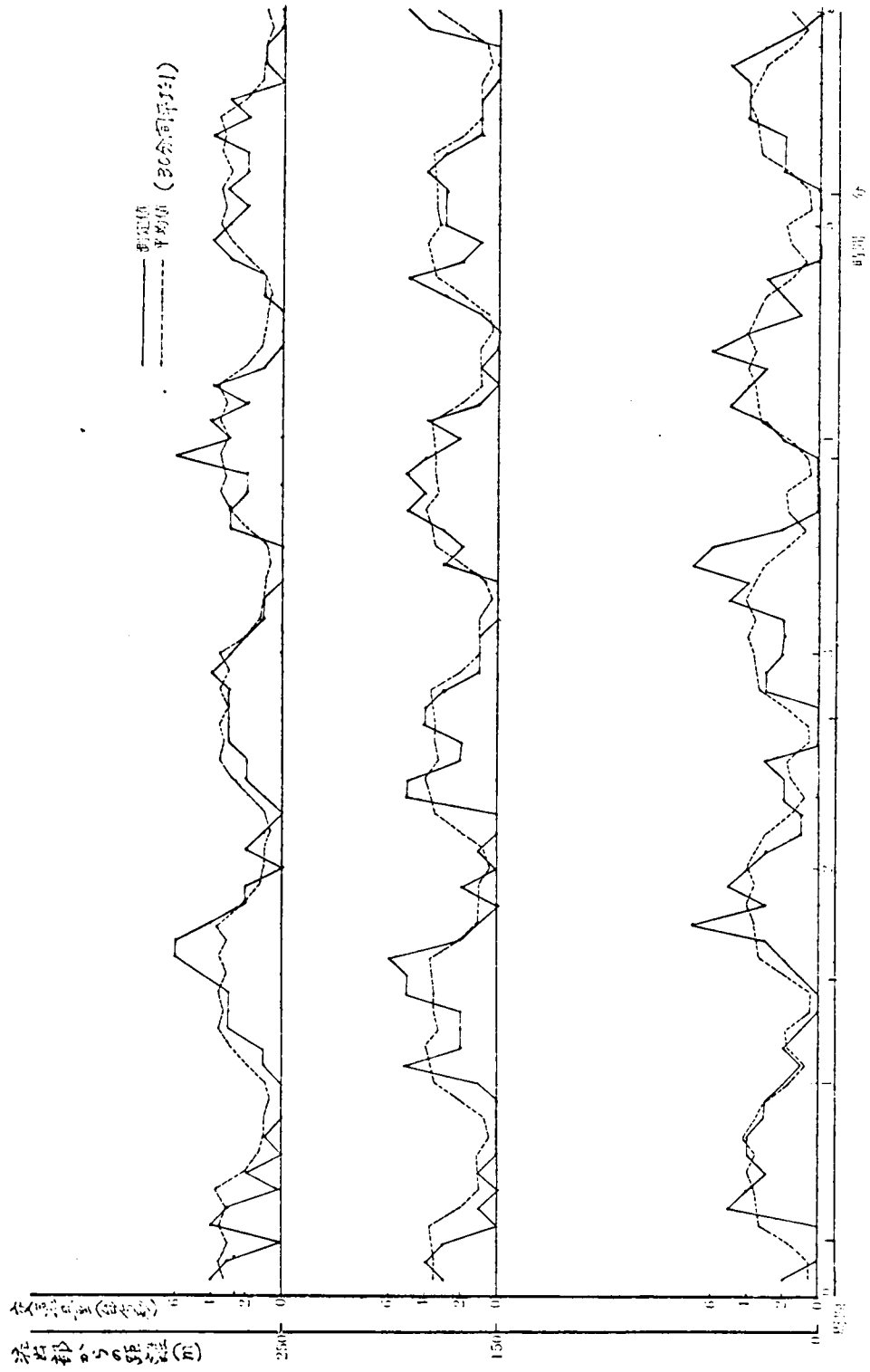


図-2.3.3 草群坂形の観測例

C : 信号の周期長

R : 赤信号時間

G : 青信号時間

さて、いま車の平均速度を \bar{v} (簡単のために交通量に関係なく一定とする) とすると、交差点 B を出発した車が一周期の間に進む距離 L_c は

$$L_c = \bar{v} C$$

で表わされる。

ここで、 $[\alpha]$ を α をこえない最大の整数とすると

$$l = L - \left[\frac{L}{L_c} \right] \cdot L_c$$

で表わされる距離 l は、交差点 b から流出してきた交通量 $q(t)$ を図-2.3.4 のようにかき、その頂点を交差点 b から

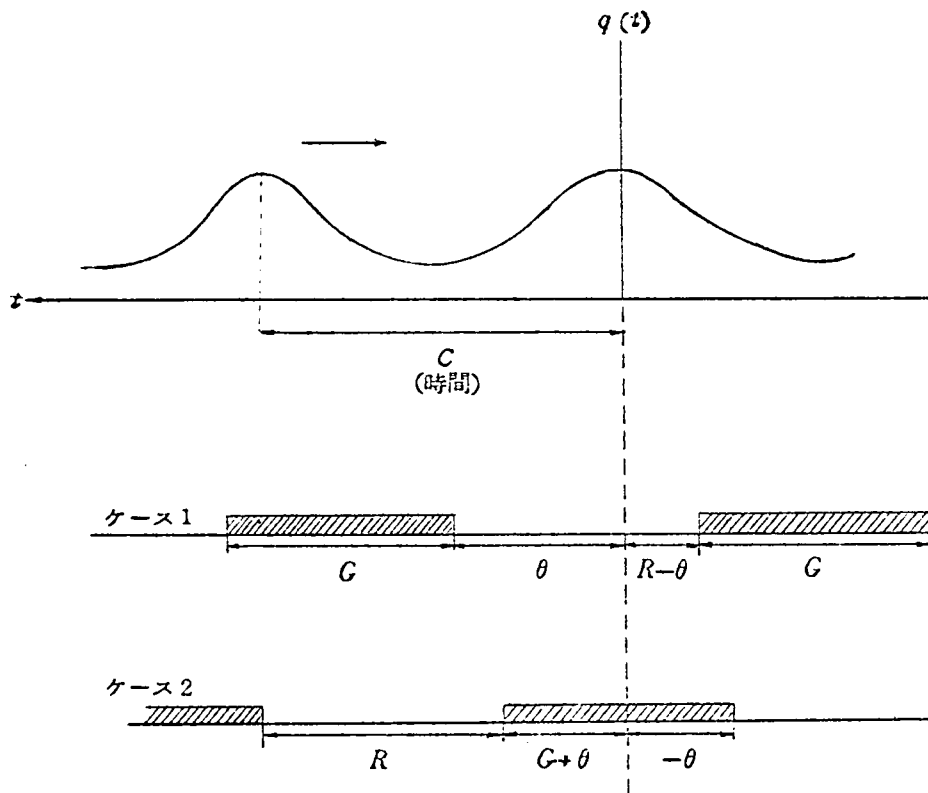


図-2.3.4 車線波と現示の関係

青信号で流れしてきた車群の代表的と考えたとき，交差点 a から最初の $g(t)$ の頂点までの距離と解釈することができる。便宜的に，いまこの頂点を $g(t)$ の時間軸の原点とすると，この時点における交差点 a の信号表示は赤信号（ケース 1）か，青信号（ケース 2）であるが，まずケース 1 の場合について考える。交通損失を求める前に，そのために必要な量，すなわち，赤信号が始ってから，信号が青に変わり，一番最後の停止車が動き始めるまでの時間 τ を求めてみる。

図 - 2.3.4 に示したように， $t=0$ では交差点 a の赤信号時間はすでに $R-\theta$ 経過しているから，時間の原点にとった $g(t)$ の頂点から交差点 a までの時間距離 l/v も考慮すると，けっきょく， $g(t)$ 曲線の $t_0 = -\{(R-\theta) + (l/v)\}$ の時点から赤信号で流れが止められていることになる。1 周期の間に停止する車は，この t_0 から τ までに到着する車で，それらの停止した車が動き出すときには必ず発進遅れ T 秒を伴うものとするれば， τ の内訳はこの発進遅れによる時間と赤信号時間とから成り立っていると考えられるから，けっきょく次式が成立する。

$$T \cdot \int_{-t_0}^{\tau-t_0} g(t) dt + R = \tau \quad (2.3.1)$$

上式の関係を利用することにより， τ が計算される。

一方，ケース 2 の場合はまったく同様な考察から

$$T \cdot \int_{-\{ \frac{l}{v} - (G+\theta) \}}^{\tau - \{ \frac{l}{v} - (G+\theta) \}} g(t) dt + R = \tau \quad (2.3.2)$$

式 (2.3.2) において $G = C - R$ とおくと

$$T \cdot \int_{C-t_0}^{C+\tau-t_0} g(t) dt + R = \tau$$

となり，この式でさらに $t = z + C$ の変数変換を行ない， $g(t)$ が C を周期とする周期関数であることを考えると，左辺第一項は

$$T \cdot \int_{-t_0}^{T-t_0} g(z+C) dz = T \cdot \int_{-t_0}^{T-t_0} g(z) dz$$

となり，けっきょく式(2.3.2)は式(2.3.1)と一致することがわかる。

このようにして T が求められると，待ち時間，停止回数，行列長および走行所要時間損失が以下のようにして計算される。

(1) 待ち時間

説明の簡単のために， t の原点を新たに R が始った点に移動して考える。まず， R 内に到着した車の待ち時間であるが，これは赤信号が終了するまでの信号待ち時間と，青信号が始まってから前の停止車が動き出すまでの発進遅れによる待ち時間とから成立っている。他方，青信号開始後に新たに待ち行列に加わった車の待ち時間は，信号現示がすでに青信号になっているわけであるから，信号による待ち時間はなくて，当該車より前方にある停止車の発進遅れによる待ち時間のみにから成立っている。このようなことから，1周期の間に発生する待ち時間 S_{ab}^w は以下のような式によって計算されることがわかる。

$$S_{ab}^w = \int_0^R g(t-t_0) \cdot \left\{ (R-t) + T \cdot \int_0^t g(\xi-t_0) d\xi \right\} dt \\ + \int_R^T g(t-t_0) \cdot T \cdot \left\{ \int_0^t g(\xi-t_0) d\xi - g_s \cdot (t-R) \right\} dt \quad (2.3.3)$$

ただし， g ：飽和交通量

(2) 停止回数

停止回数の算定は，1周期内に当刻交差点で停止させられる台数であるから，赤信号が始まってから τ 以内に到着する車の数として容易に行なうことができる。すなわち，いま求めるものを S_{ab}^s と表わすと

$$S_{ab}^s = \int_0^{\tau} f(t - t_0) dt \quad (2.3.4)$$

のようになる。ここでは，一度停止した車はその周期以内に完全に捌かれることを前提としているので，停止台数がそのまま停止回数となるわけである。

(3) 行列長

車が待ち行列をつくっている場合の車頭間隔を b_0 とすれば，求める行列長 S_{ab}^l は

$$S_{ab}^l = b_0 \cdot S_{ab}^s = b_0 \cdot \int_0^{\tau} f(t - t_0) dt \quad (2.3.5)$$

(4) 走行所要時間損失

本来，走行所要時間を求めるべきであるが，このためには，交差点間距離を規定し，その間を通過する時間を計算するというように，信号の影響範囲以外のところにおける状態まで考慮することになるので，ここではとくに信号の影響を受けた車のみに着目し，その車が信号の影響を受け始めてから受け終るまでに走行する距離について，もしその距離を平均速度で走行していたならば，要したであろう所要時間と実際に要した時間との差という形で走行所要時間損失を計算してみることとする。

このために，まず赤信号が始まってから，青信号で飽和交通流がとたえるまでの時間で τ' を求めてみる。つまり，この

τ' 内に到着した車は何らかの形で信号の影響を受けることになるからである。

さて、 τ' の意味を考えてみると、 R 開始時点から τ' の間に到着した車は、ちょうど青信号が始ってから τ' 時点までの時間、つまり、 $(\tau' - R)$ なる時間の飽和交通流によって捌き切れる必要があるので次式が成立する。

$$\int_0^{\tau'} f(t - t_0) dt = f_s \cdot (\tau' - R)$$

この式より τ' が求められる。

つぎに、求められた τ' を利用して走行所要時間損失を計算してゆくが、まず $0 \sim \tau$ の間に到着した車については必ず一度停止するから、いま車の減速度および加速度を δ , α としたとき、1台あたりの損失は

$$\left\{ \left(\frac{\bar{v}}{\delta} + \frac{\bar{v}}{\alpha} + \text{待ち時間} \right) - \frac{1}{\bar{v}} \left(\frac{\bar{v}^2}{2\delta} + \frac{\bar{v}^2}{2\alpha} \right) \right\}$$

となるから、全体では式(2.3.3)も考慮して、

$$\begin{aligned} & \int_0^R f(t - t_0) \left\{ \left(\frac{\bar{v}}{\delta} + \frac{\bar{v}}{\alpha} \right) + (R - t) + T \cdot \int_0^t f(\xi - t_0) d\xi - \frac{1}{\bar{v}} \left(\frac{\bar{v}^2}{2\delta} + \frac{\bar{v}^2}{2\alpha} \right) \right\} dt \\ & + \int_R^{\tau} f(t - t_0) \left[\left(\frac{\bar{v}}{\delta} + \frac{\bar{v}}{\alpha} \right) + T \cdot \left\{ \int_0^t f(\xi - t_0) d\xi - f_s \cdot (t - R) \right\} - \frac{1}{\bar{v}} \left(\frac{\bar{v}^2}{2\delta} + \frac{\bar{v}^2}{2\alpha} \right) \right] dt \\ & = \left(\frac{\bar{v}}{2\delta} + \frac{\bar{v}}{2\alpha} \right) \cdot S_{ab}^s + S_{ab}^w \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

となる。

つぎに、 $\tau \sim \tau'$ の間に到着する車の損失であるが、これについては便宜的に以下のような方法で計算することを考えてみた。まず、 $\tau + 0$ の時点に到着する車は、ほぼ 0 に近い速度にまで減速してから加速状態に入ると考えられ、また τ' の

時点に到着する車は，ほとんど減加速を要せず \bar{v} に近い速度を保てるものと考えられるが，いま $\tau \sim \tau'$ の間の任意時点 t における減速速度（ t に到着した車が強いられる最低の速度）を， τ から τ' まで線形に変化するものと仮定すれば，その速度 $v(t)$ はつぎのように表わされる。

$$v(t) = \frac{t - \tau}{\tau' - \tau} \cdot \bar{v} \quad (2.3.7)$$

ところが， \bar{v} から $v(t)$ まで減速し，さらに \bar{v} まで加速するとき生ずる走行所要時間損失は，つぎのように表わされる。

$$\left\{ \frac{\bar{v} - v(t)}{\delta} + \frac{\bar{v} - v(t)}{\alpha} \right\} = \frac{1}{\bar{v}} \left\{ \frac{\bar{v}^2 - v(t)^2}{2\delta} + \frac{\bar{v}^2 - v(t)^2}{2\alpha} \right\} \quad (2.3.8)$$

式(2.3.6)，式(2.3.7) および式(2.3.8)より走行所要時間損失 S_{ab}^t は，けっきょく次式のようになる。

$$\begin{aligned} S_{ab}^t = & \frac{\bar{v}}{2} \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot S_{ab}^s + S_{ab}^w + \frac{\bar{v}}{2} \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\alpha} \right) \left(\frac{1}{\tau' - \tau} \right)^2 \\ & \cdot \left[\tau'^2 \int_{\tau}^{\tau'} g(t - t_0) dt - 2\tau' \int_{\tau}^{\tau'} t g(t - t_0) dt \right. \\ & \left. + \int_{\tau}^{\tau'} t^2 g(t - t_0) dt \right] \end{aligned}$$

以上のような簡単な数式モデルによって，各種交通損失が計算されるが，実際の計算にあたっては $g(t)$ の具体的な形や諸定数値を与える必要がある。

2.3.3 交通損失とオフセットの関係

ここでは交通損失とオフセットの関係を，具体的な計算をとおして検討することとするが， $g(t)$ の形として，余弦波を仮定した場合と矩形波を仮定した場合との2つの場合について調べてみる。

(1) 交通量波形を余弦関数とした場合

図-2.3.3より, $g(t)$ として平均的にはほぼ余弦波の取扱いをしてもよいことがわかるので, 図に現われている傾向を考慮して

$$g(t) = \bar{g} + 0.5 \bar{g} \cos\left(\frac{2\pi}{C} t\right)$$

のような関数を考える。ただし,

$$\bar{g}: g/3,600$$

$$g: 1 \text{ 時間交通量}$$

$$C: \text{周期長}$$

また, その他の定数値は $T=1(\text{sec})$, $\bar{v}=12.5(\text{m/sec})$, $\delta=\alpha=2(\text{m/sec}^2)$, $L=300(\text{m})$, $g_s=0.5(\text{台/sec})$ のように与える。

さて, まずオフセットと前述した各種損失の関係であるが, 交通量 700 台/時・車線, 周期 100 秒, スプリット 50 秒の場合について計算結果をグラフに示すと図-2.3.5 のようになり, これより, 各損失はオフセットの変化にたいして, 最小値および最大値をそれぞれ一つずつ有する曲線をなして変化すること, 待ち時間と走行所要時間損失はほぼ同傾向の変化をするのに対し, 停止回数は個別的な変化をしていることなどの事実を見ることが出来る。

つぎに, おのおのの損失とオフセットとの関係を交通量別にグラフに描いてみると図-2.3.6 ~ 図-2.3.8 のようになるが, これらの図から交通量のいかんにかかわらず, オフセット—損失曲線は同じような傾向で変化することがわかる。もちろん, ここでは交通量に関係なく走行速度を一定とした

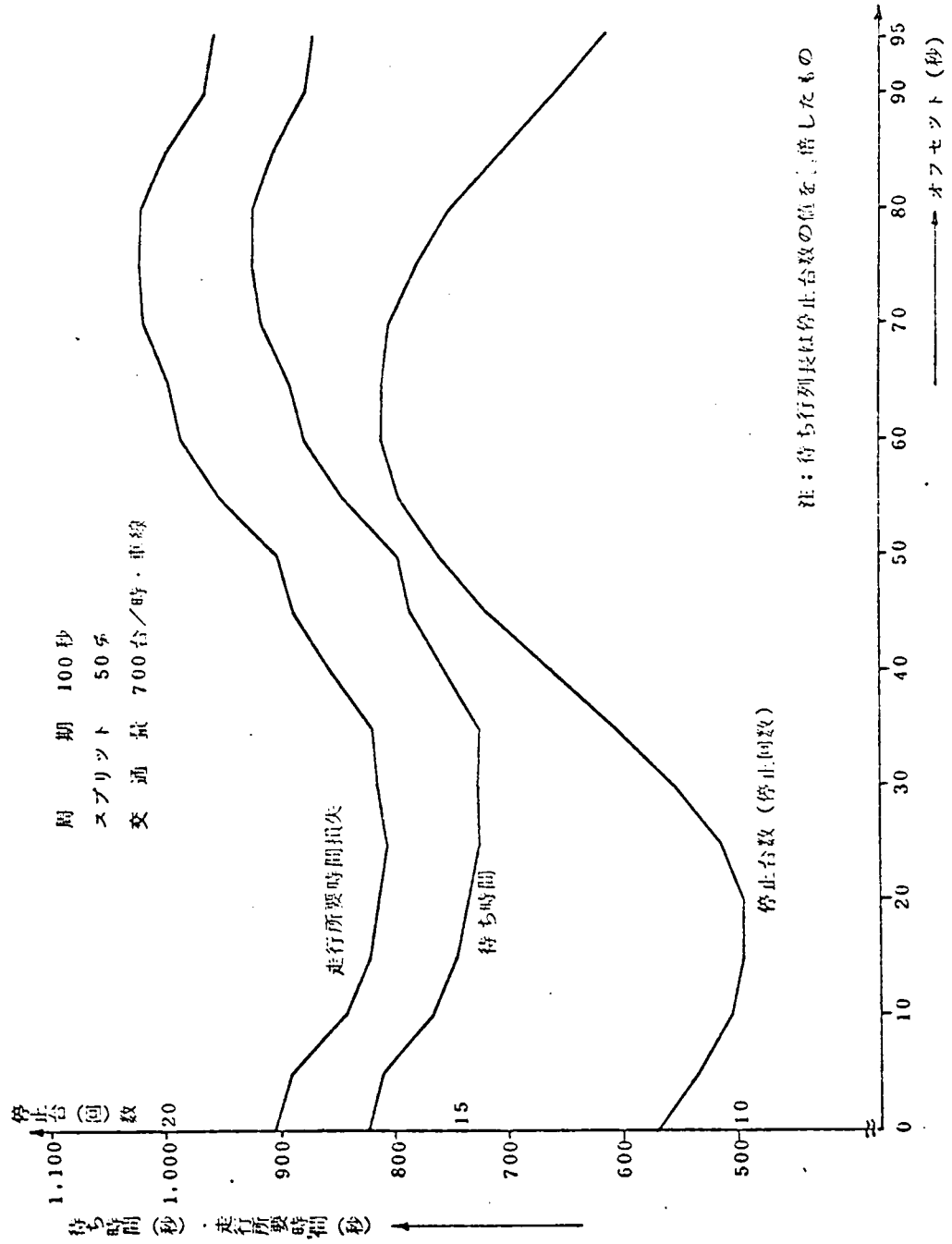


図-2.3.5 各交通相とオフセットの関係

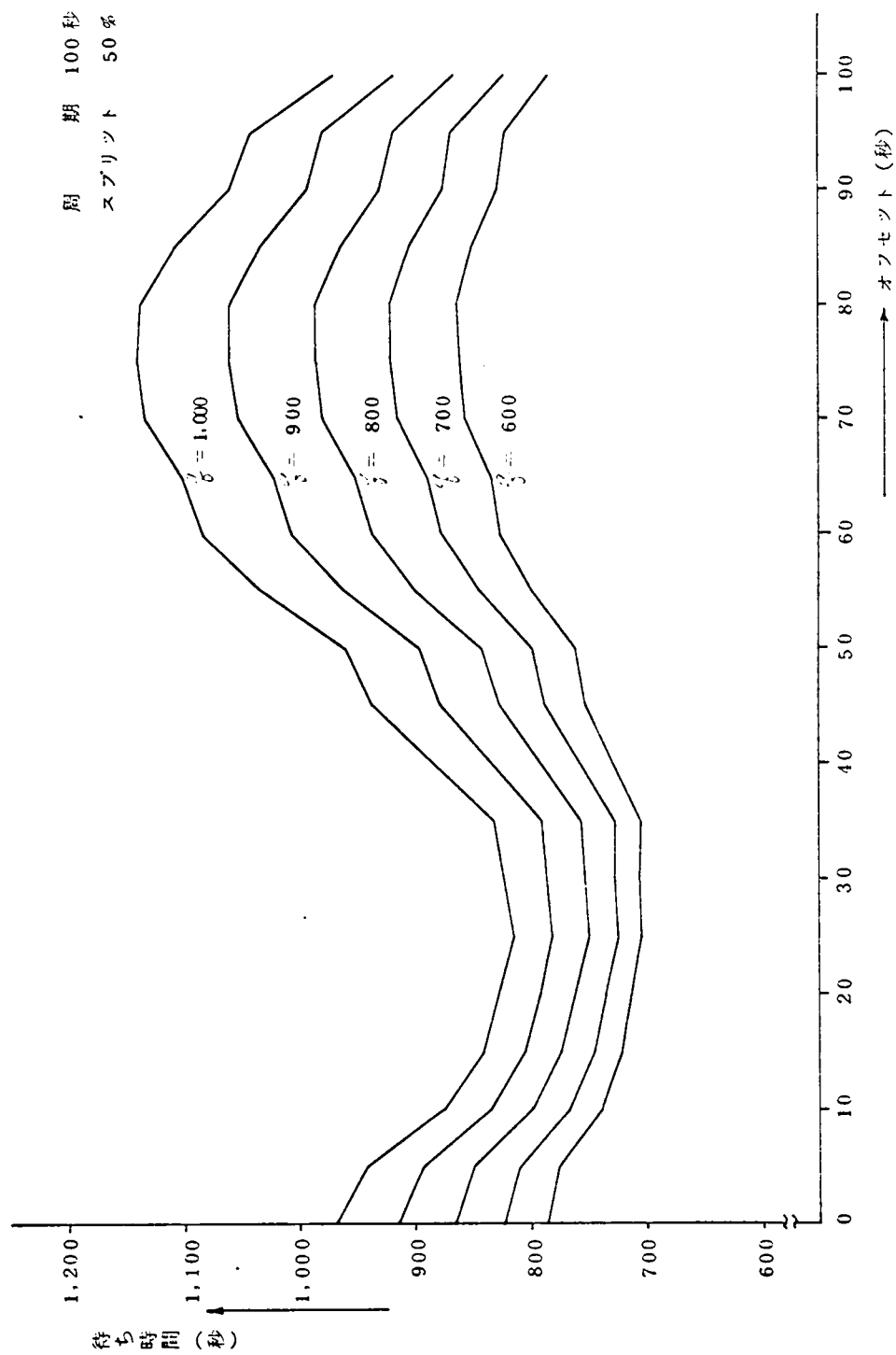


図-2.3.5 待ち時間損失 S_{ab}^w と θ_{ab}^w の関係

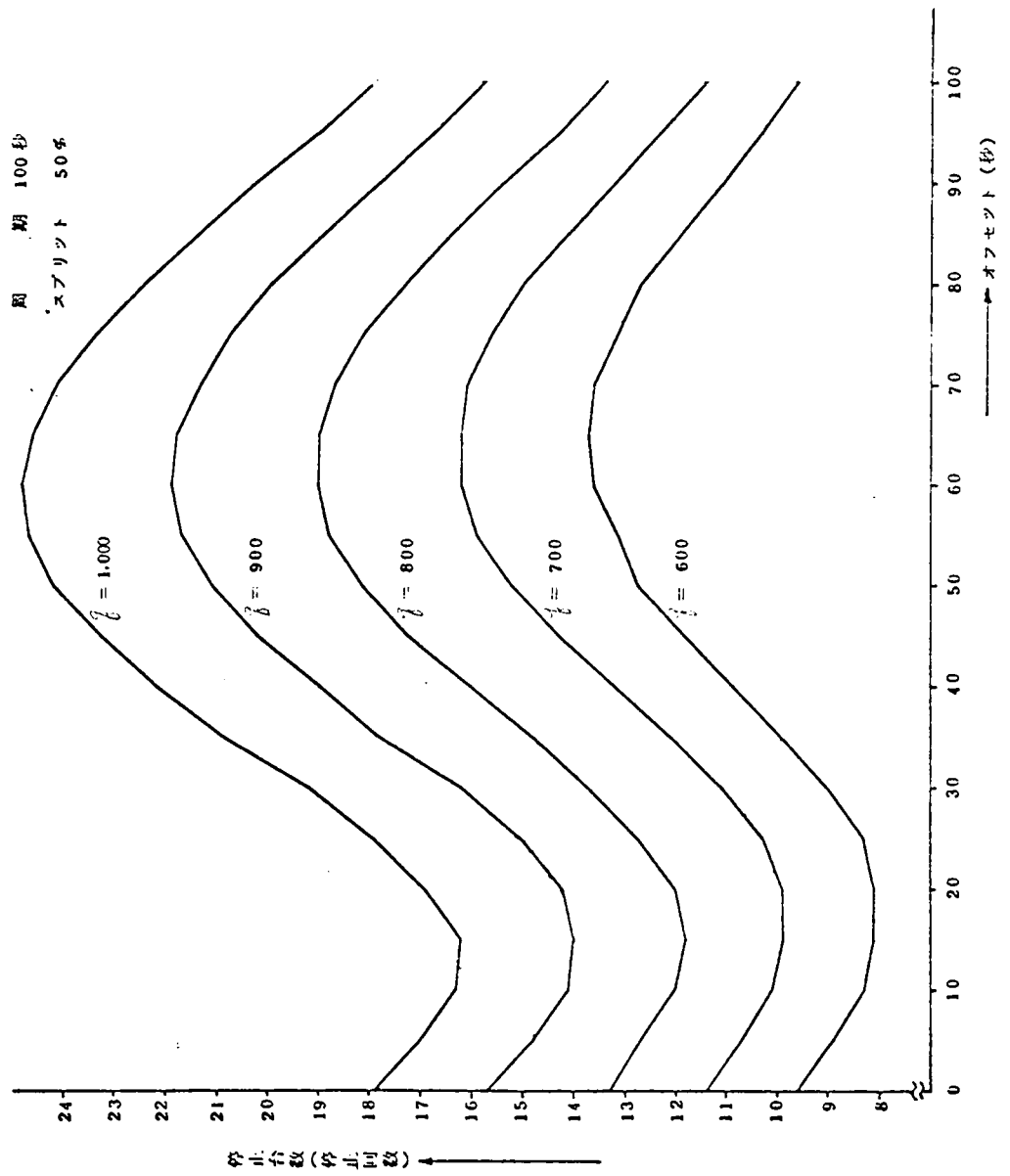


図-2.3.7 停止回数 S_{st} と θ_{st} の関係

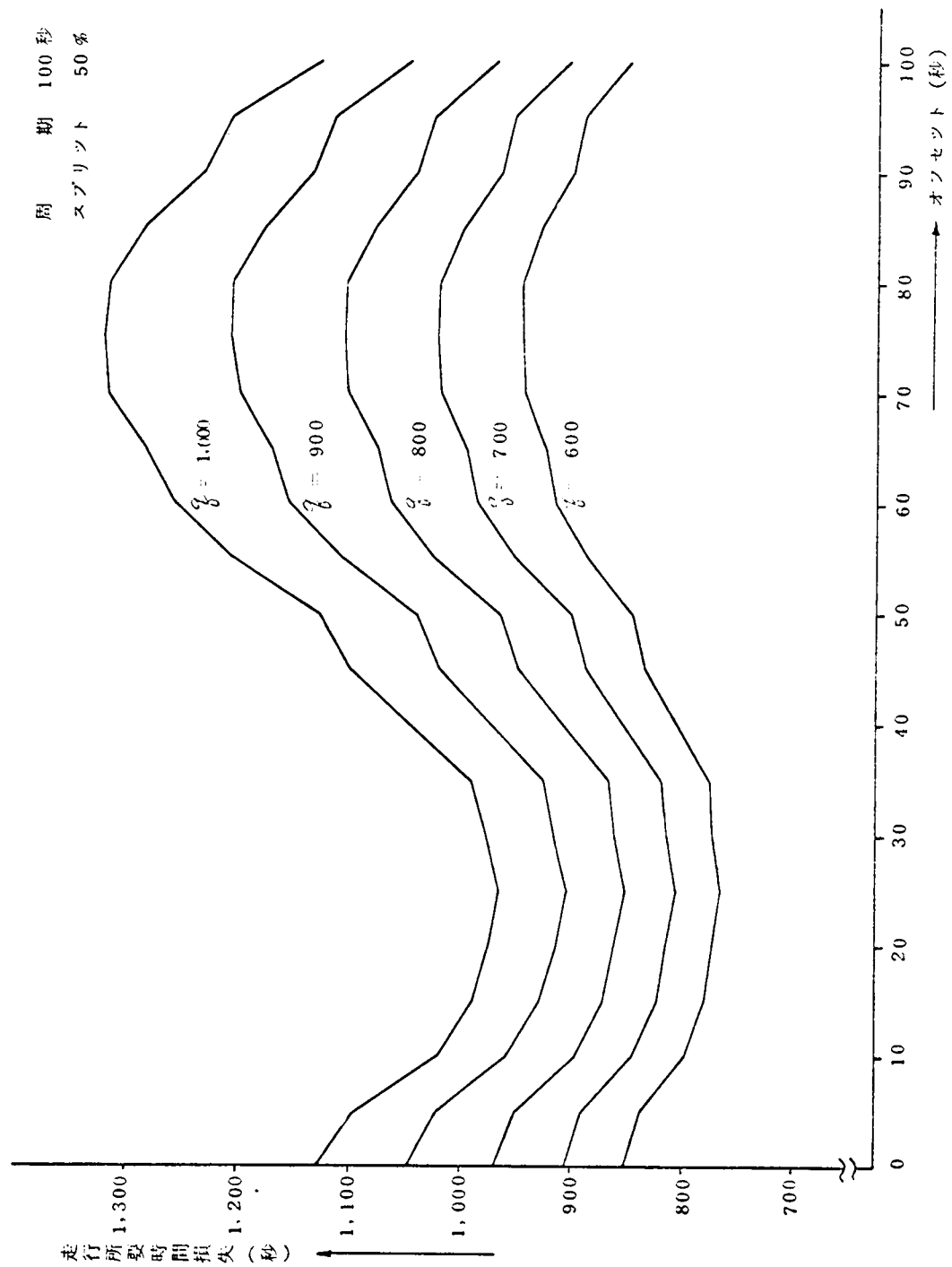


図-2.3.8 走行所費時間損失 S_t と θ_{Δ} の関係

り、加減速の過程もあまり厳密には考慮していないなど、実現象とは異なった仮定があるので、もう少し実際的な傾向を見るためには詳細な現場からの資料に基づいて理論構成が要求されると考えられる。

さて、これらの損失曲線をオフセットと交通量の関数として定式化することをつぎに考えてみる。いま、オフセットを θ_{ab} 、交通量を q のように表わすものとすれば、図-2.3.6 ~ 図-2.3.8 から洞察により

$$\text{損失 } S_{ab} = a(q) - b(q) \cos \left[\frac{2\pi}{C} (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \right]$$

q : 交通量 (台/時)

$a(q)$: q によって定まる定数

$b(q)$: "

θ_{ab}^* : 交差点 a, b 間の損失最小に対応する相対オフセット

のように余弦関数の適用を考えることもできるので、問題は $a(q)$, $b(q)$ が q の関数としていかに表わされるかを調べることになる。

まず、待ち時間の関数の $a(q)$ と q の関係を調べてみると、図-2.3.9 のようになる。この図で破線は計算された点を直接結んだものであるが、緩やかな凹形を成しており、簡単には2次曲線が適合しそうである。しかしながら、凹形が極めて緩慢なので、実線で示したような直線式をあてはめることも可能であろう。同様に待ち時間数の $b(q)$ と q の関係は図-2.3.10 のようになり、これもまた直線式で近似できるとがわかる。他の損失についてもほぼ同じような傾向が見られ、 q の1次または2次式として $a(q)$, $b(q)$ を与えうる（

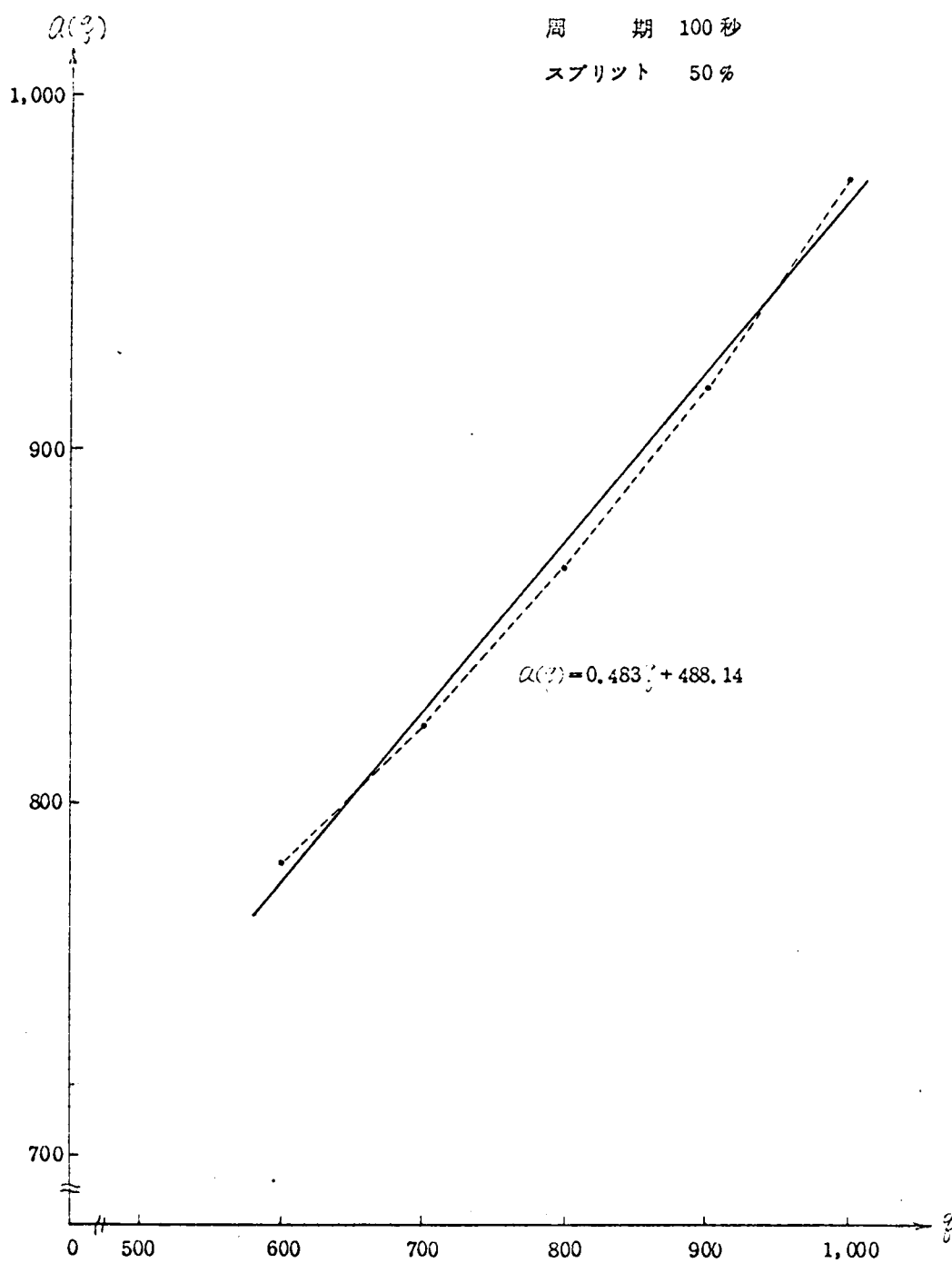


図-2.3.9 待ち時間損失の $Q(\rho)$ と ρ の関係

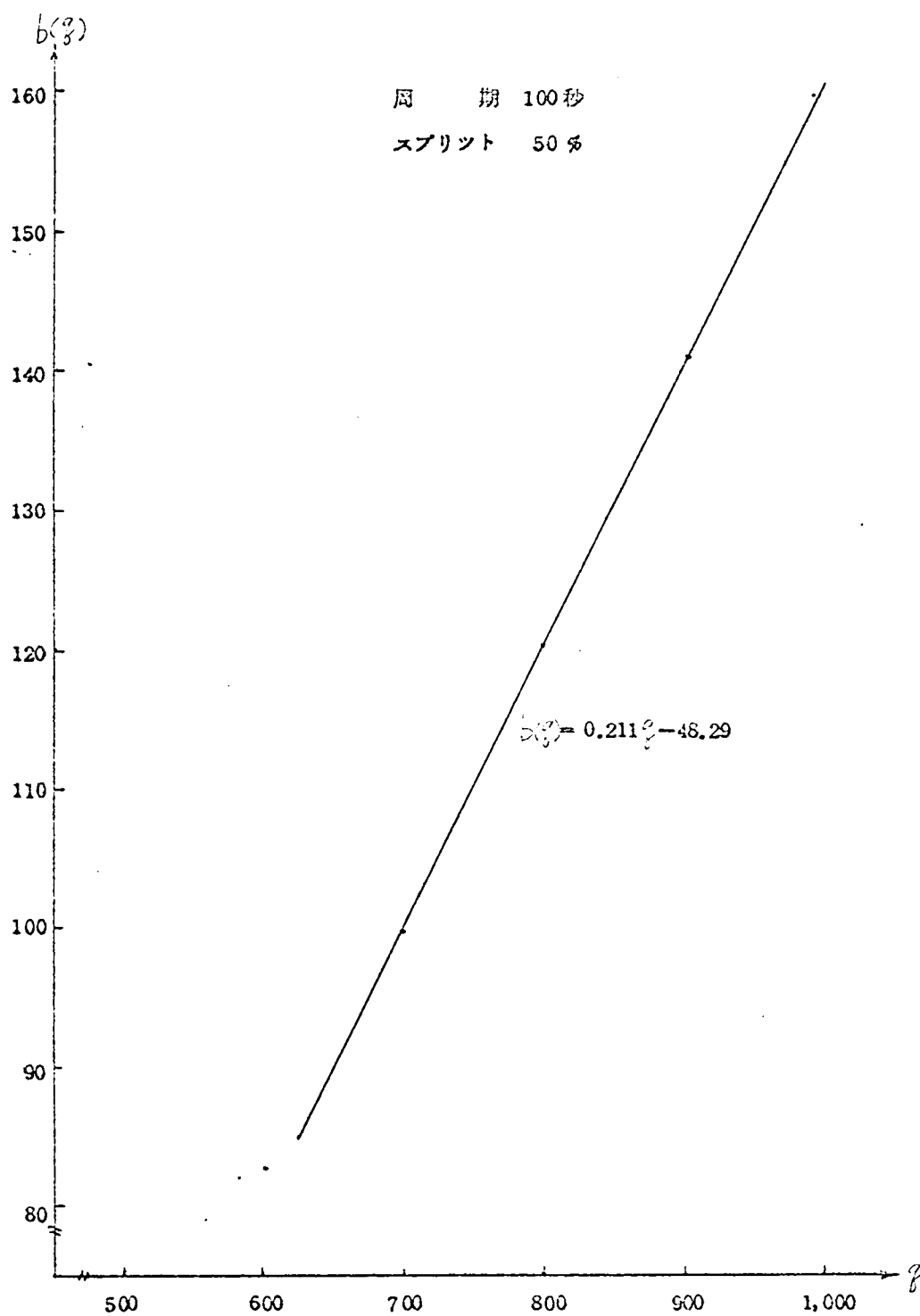


図-2.3.10 待ち時間損失の $b(\phi)$ と ϕ の関係

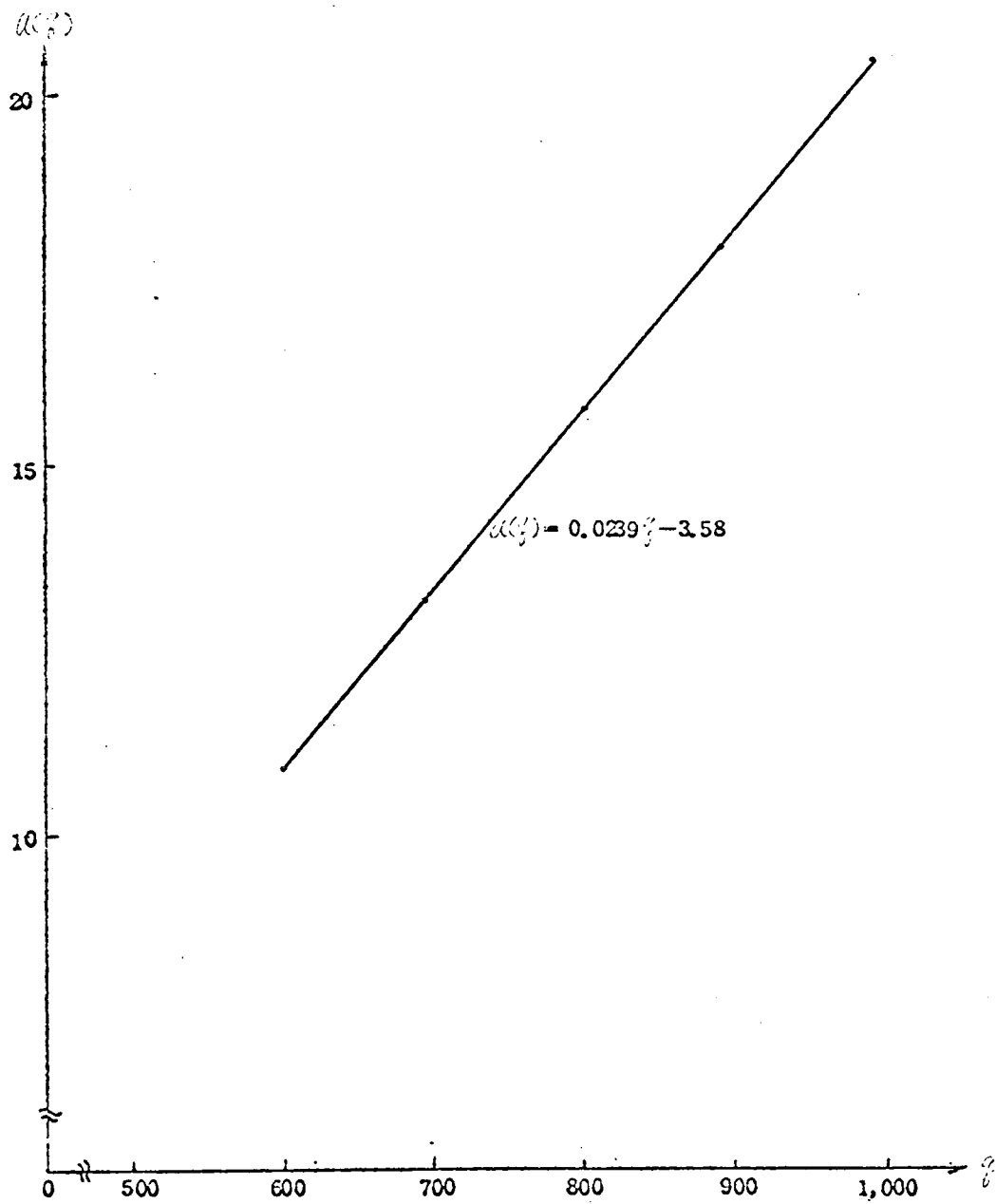


図-2.3.11 停止回数損失の $Q(P)$ と P の関係

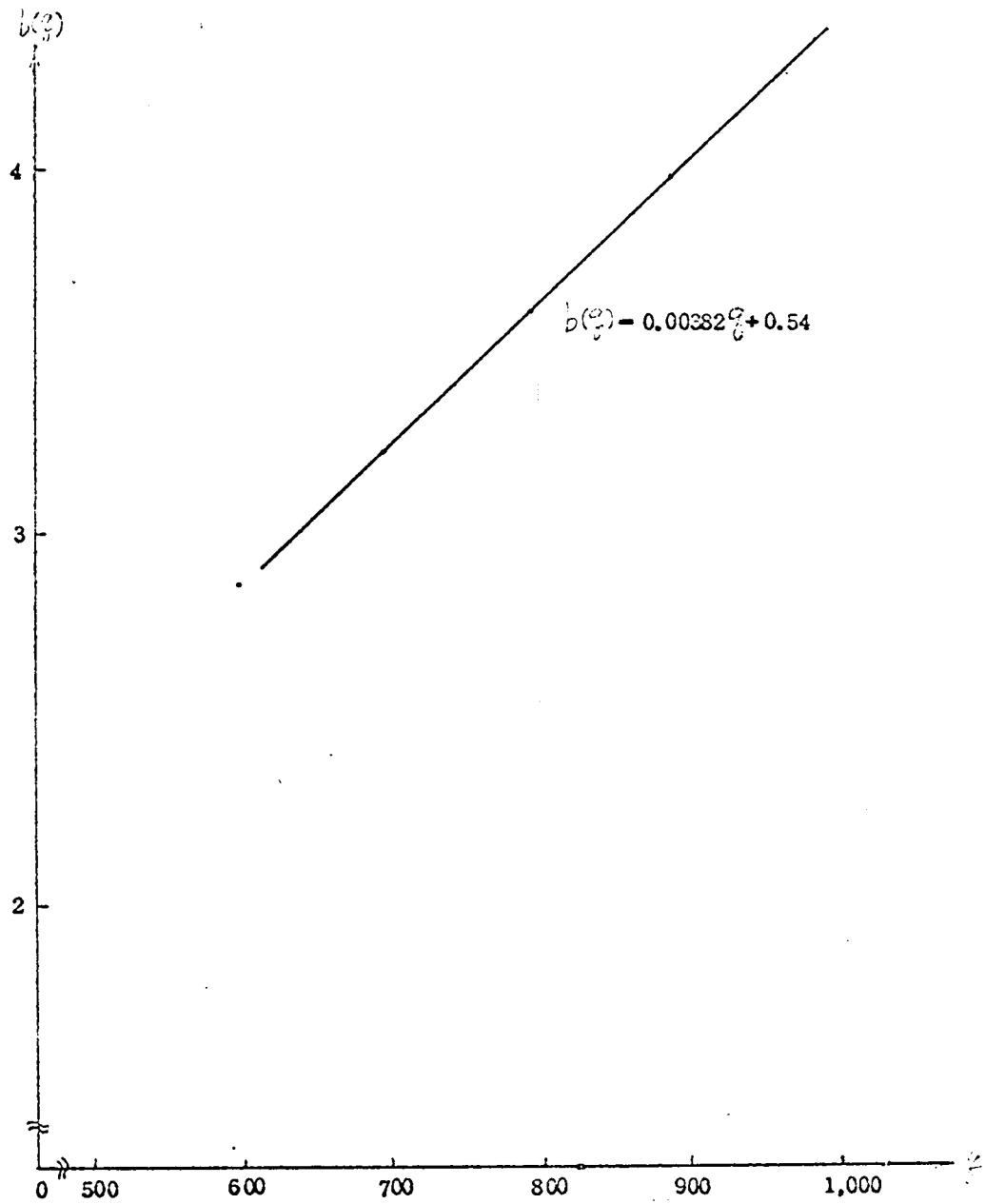


図-2.3.12 停止回数損失の $b(q)$ と q の関係

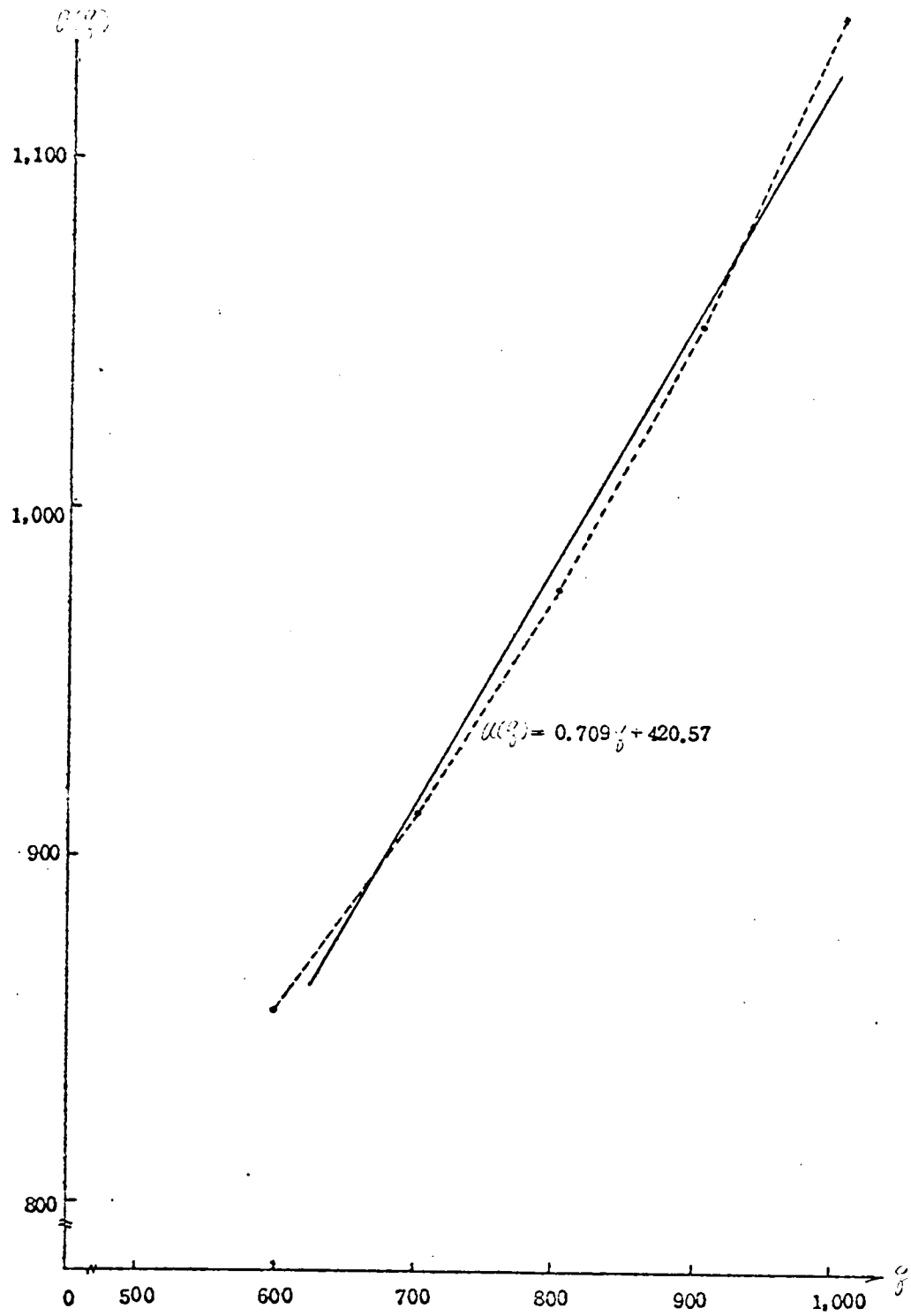


図-2.3.13 走行所要時間損失 $a(x)$ と x の関係

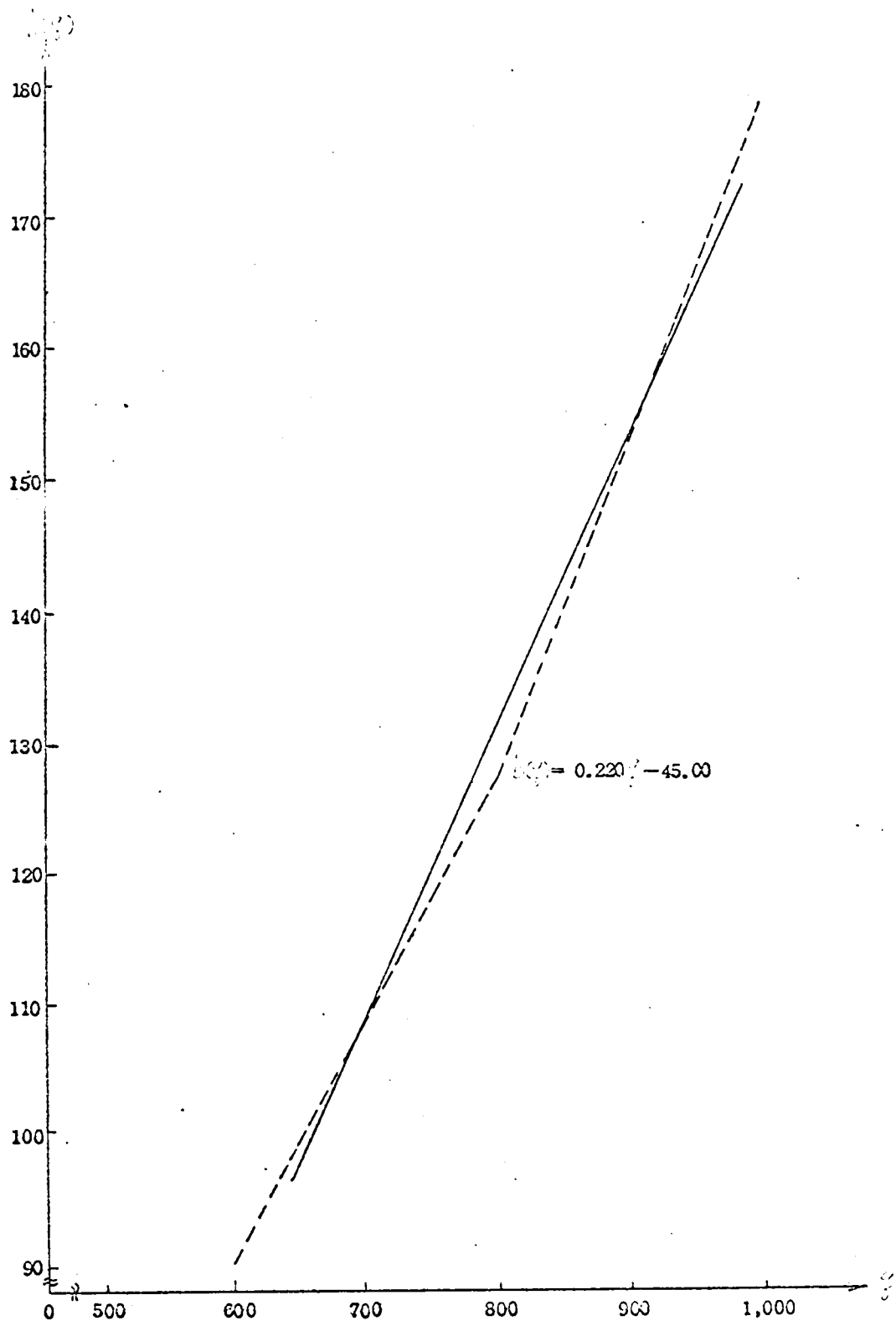
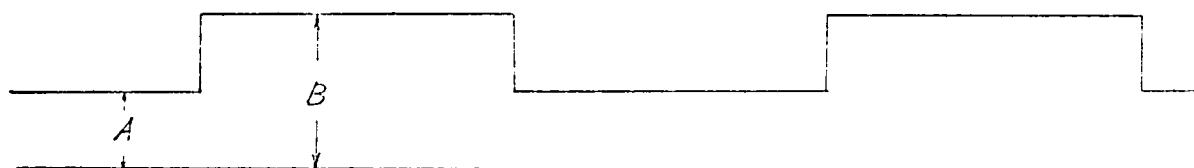


図-2.3.14 走行所要時間損失の $b(x)$ と x の関係

図-2.3.11～図-2.3.14 参照)。

(2) 交通量波形を矩形波とした場合

つぎに、図-2.3.3のような交通量波形を、図-2.3.15に示したような矩形波とした場合には、交通損失をオフセットの関係はどのようになるであろうか。



注), 計算例の場合 $A/B = 0.5$

図-2.3.15 矩形波交通流

まず最初に待ち時間について調べてみると、図-2.3.16のようになり、図-2.3.6と同様に最小値と最大値をそれぞれノットつ有する余弦波的曲線になることがわかる。ただし、矩形波の場合は最大値と最小値の差がかなり大きくなっていること、最大値および最小値の大きさそのものは余弦波の場合に比べ、20%～30%それぞれ増減していることなどの点に相違が見られる。このことは、あるオフセットのもとでは図-2.3.15に示したような矩形波の場合には、余弦波の場合と比べて大きい値の交通量が連続して到着したり(図-2.3.15のBの場合)、逆に、小さい値の交通量が続いたり(図-2.3.15のAの場合)することがおこることを考えれば、当然のこととして理解できる。平均待ち時間損失の値は、余弦波交通流の場合の値とほぼ一致する。

つぎに、停止回数であるが、これとオフセットとの関係は図-2.3.17のようになる。概略の曲線の形は図-2.3.7の曲線に似ているといえるが、部分的に不連続的な変化をしてい

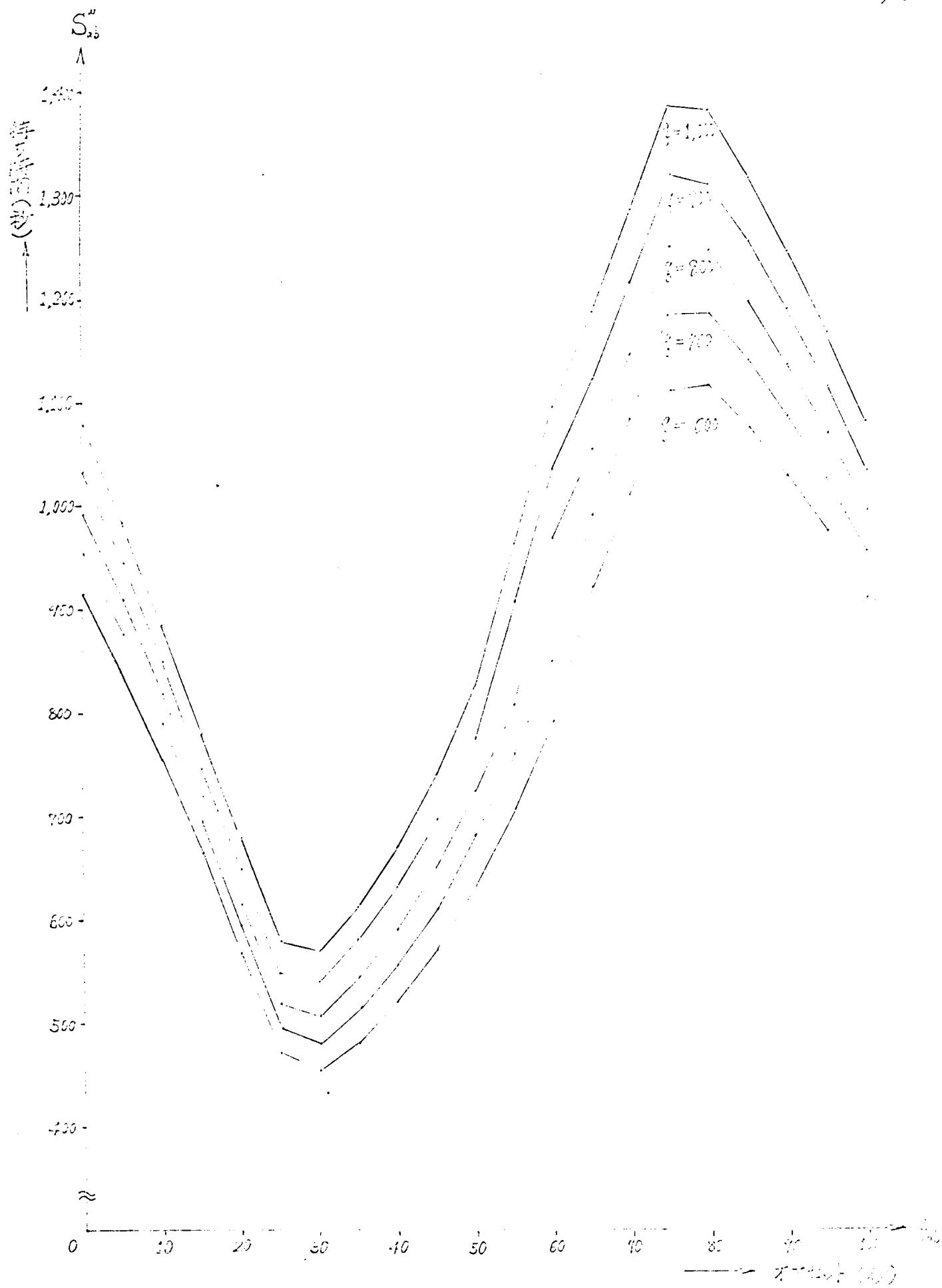


図 2.5.16 傾斜角関係 $S_{2\beta}''$ と $S_{2\beta}$ の関係

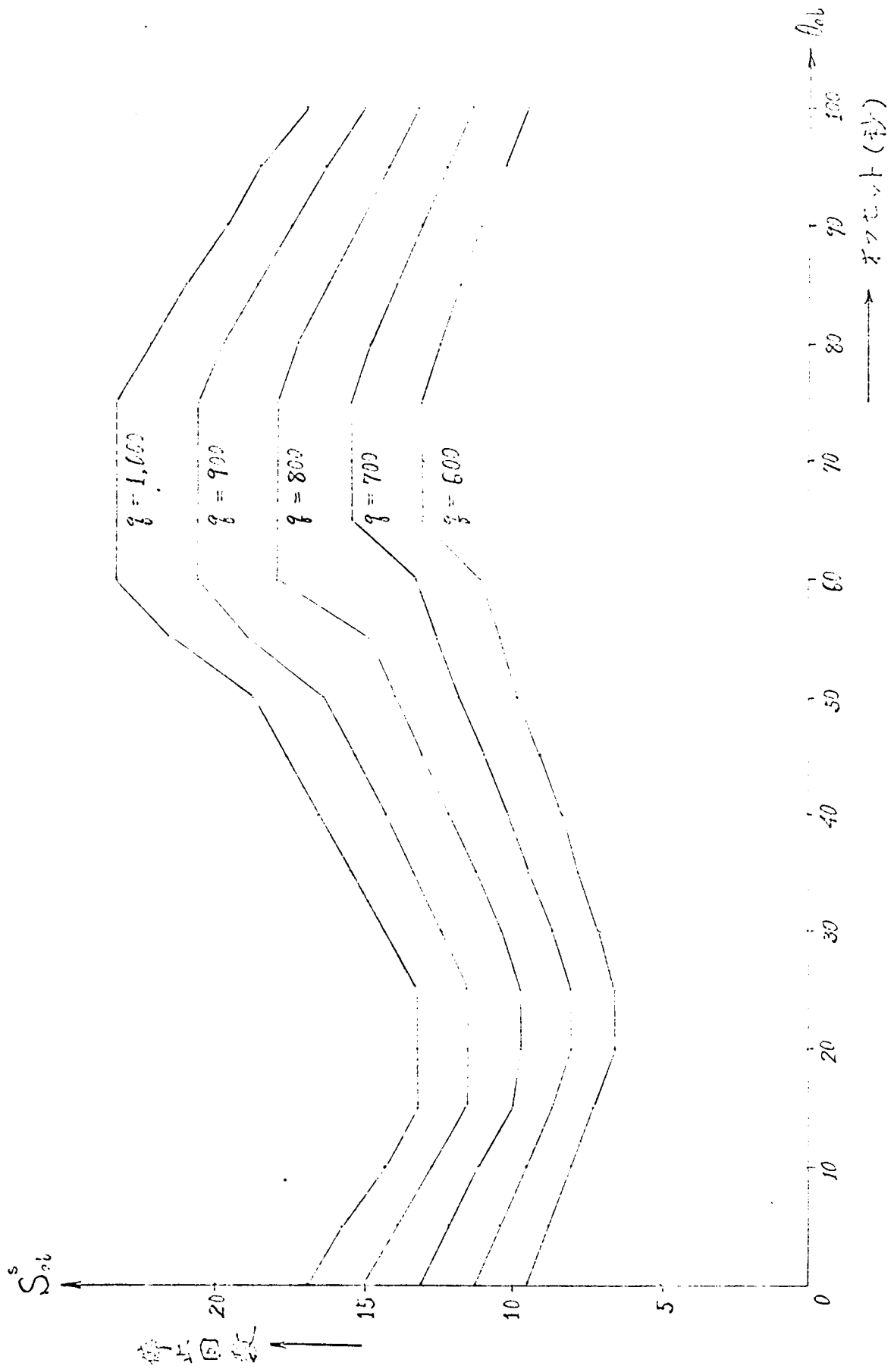


图-2.3.17 停止回数損失 S_{ab}^s と θ_{ab} の関係

る。すなわち，オフセット θ_{ab} が 15～25 の範囲では一定，50～60 の範囲で急増，60～75 の範囲で一定という傾向である。また，平均値的には，余弦波流の場合に比べ約 10% 程度少なくなっている。

2.3.4 交通損失とスプリットおよび周期との関係

まずはじめにスプリットと交通損失の関係について検討してみる。いま，損失として平均待ち時間（あるスプリットの条件下で，オフセットを種々に変化させたものについての平均）をとり，これとスプリットの関係調べてみると図-2.3.18 のようになり，2 次曲線的変化をしていることがわかる。なお，図中のプロットされた点のうちには，実際には交通を捌けないうスプリットに対応する点もあるが，待ち時間としては 1 周期間のもののみをとっている。また，交通量波形は余弦波を採用している。

つぎに，周期と平均待ち時間損失の関係を調べてみると図-2.3.19 のようになり，スプリットの場合と同じように緩やかな 2 次曲線的な変化を示すことがわかる。もちろん，この場合も損失としては 1 周期のみの待ち時間を考えているので，ある値以下の周期については，交通は実際には捌き切れない場合もある。としかく，周期と交通損失の関係は図のように，右上りの単調増加曲線となるわけであるから，制御上望ましい周期としては，交差点に流入してくる交通量を捌き得るという条件のもとで，可及的に小さい値がよいとする従来の判断は正しいといえよう。

2.4 シミュレーションによる検討

2.4.1 流体的モデルによるシミュレーション⁴⁷⁾

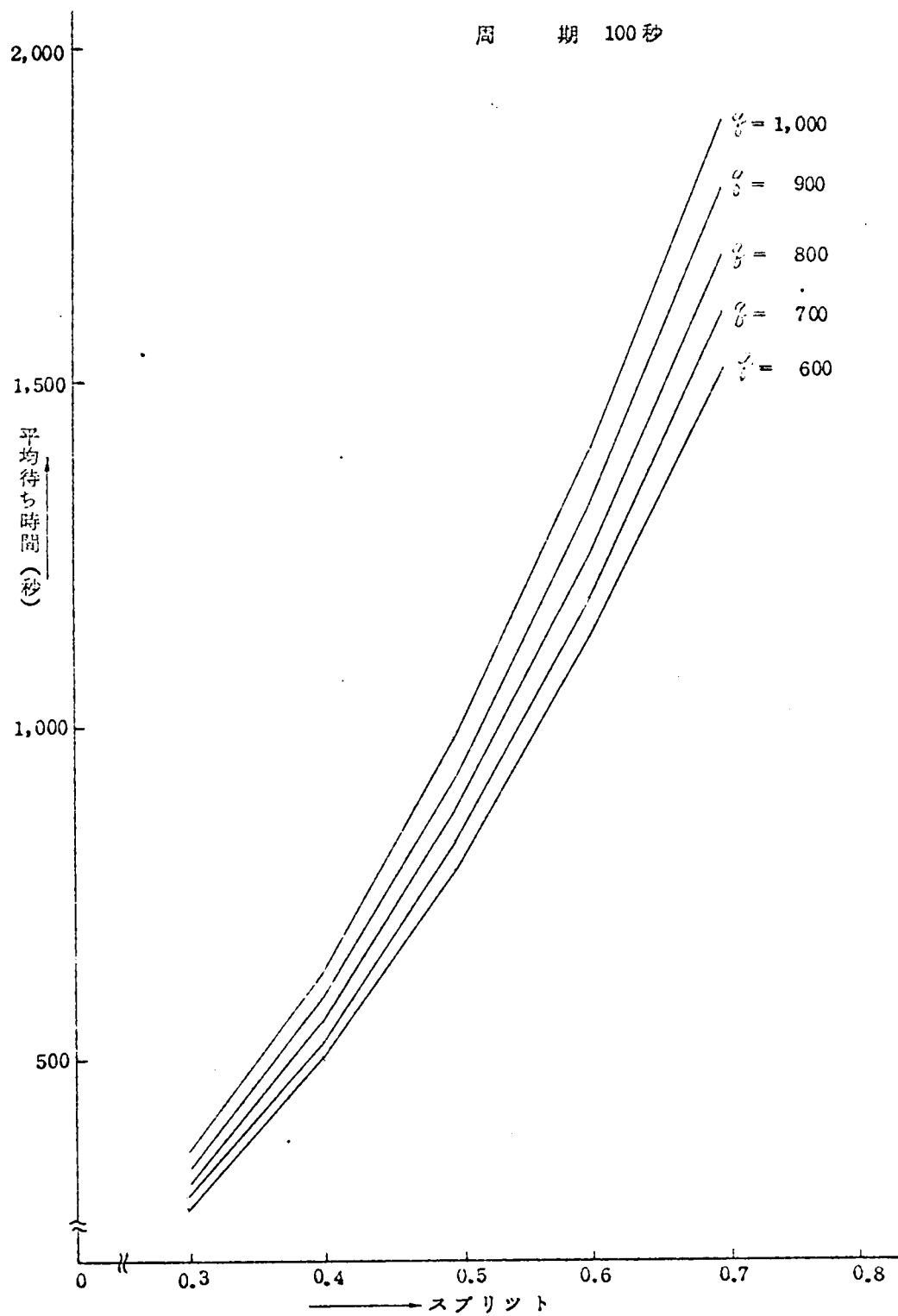


図-2.3.18 平均待ち時間とスプリットの関係

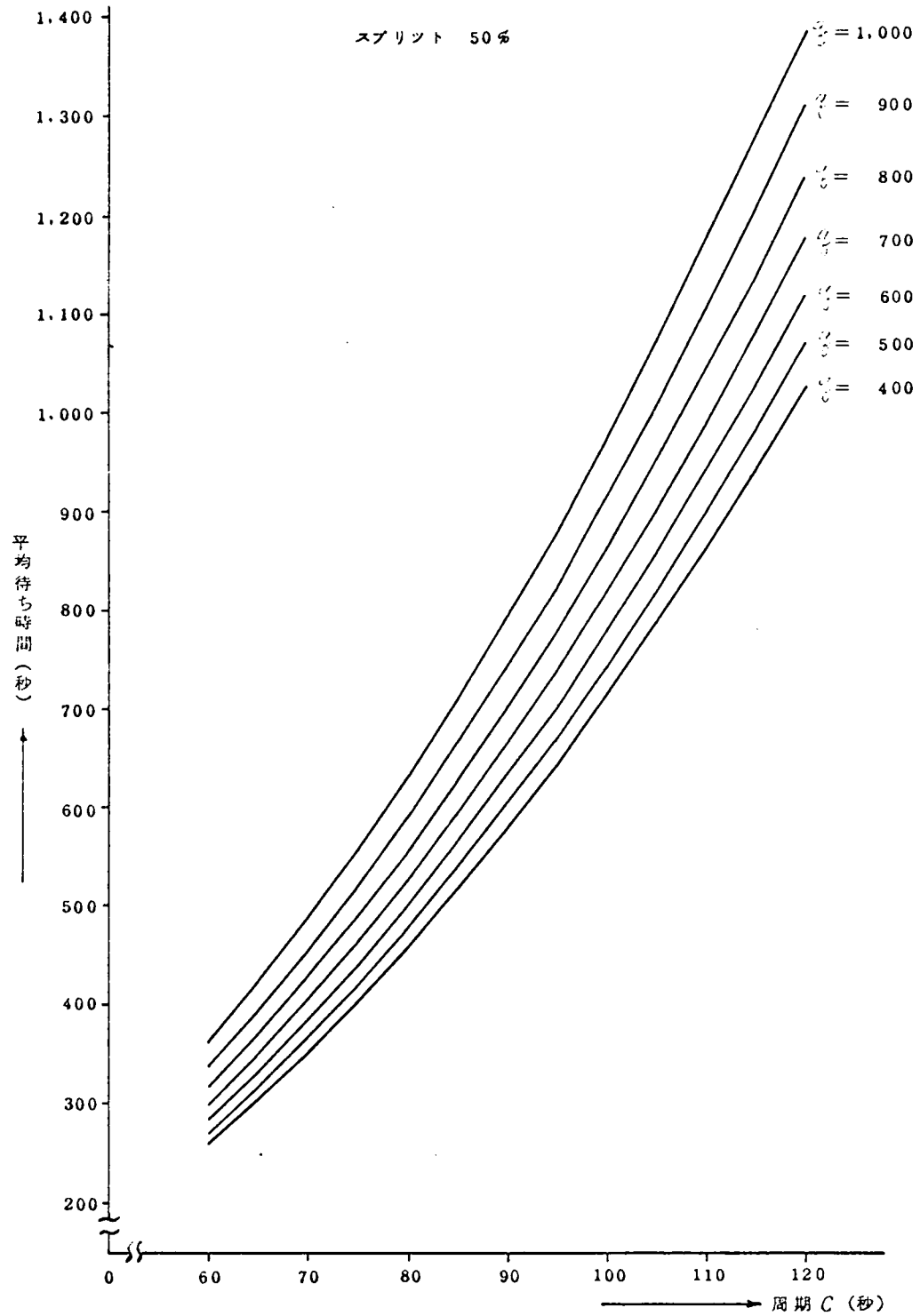


図-2.3.19 平均待ち時間損失と周期との関係

(1) シミュレーションのモデル

まず、シミュレーションの対象街路モデルとしては、図-2.4.1に示したような、 a, b, c 3つの交差点がそれぞれ300mずつ離れて存在する街路を考える。

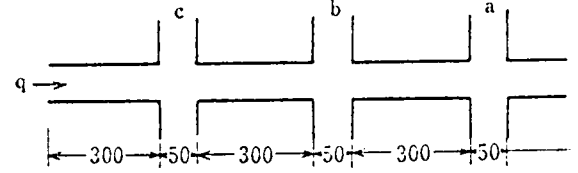


図-2.4.1 シミュレーションの対象街路

一方通行一車線で、交差点幅は50mとし、交通の交差点における右左折はないものとする。

車の移動状態を表現するために、街路を50mずつの小区間に分割し、それら区間相互の間の車の移動を、密度速度曲線を用いて行なうという、車を一種の流体視したモデルを考える。すなわち、いまある街路小区間（これを第 i 区間とする）に存在する車の平均速度を v_i 、密度を k_i としたとき、H.E. M. Keller によれば

$$v_i = v_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{k_i}{22} \right)^{1.8} \right\}^{1.5} \quad (2.4.1)$$

ただし、 v_{\max} ：車の最大速度（=50km/時とする）なる関係式が成立するので、当刻区間の全車輛が上式で計算された速度をもって前方の区間に移動してゆくという基本的原則によるわけである。

また、交通損失としては、シミュレーションが車を1台1台取扱かうモデルになっていないために、たとえば待ち時間などの量は計算されないので、新たに「つき」のような量を定義した。すなわち、第 i 区間における車1台あたりの損失 δ_i として

$$\delta_i = 1 - \frac{v_i'}{v_{\max}} \quad (2.4.2)$$

なる量を考えるのである。この量は $v_i' = 0$ 、すなわち混雑が

極めて激しい場合には1となり、 $v_i = v_{max}$ ，すなわち車がまったく自由に停滞なく走行できるような閑散な場合には0となる，いわば速度損失ともいえる量である。

そうすると，第 i 区間全体で発生する損失 S_i は，当該区間における車の総台数が区間長 l_i と密度 k_i との積によって表わされることを考えれば，式(2.4.1)および式(2.4.2)を考慮して

$$\begin{aligned} S_i &= \lambda_i \cdot l_i k_i = \left(1 - \frac{v_i}{v_{max}}\right) \cdot l_i k_i \\ &= \left[1 - \left\{1 - \left(\frac{k_i}{22}\right)^{1.8}\right\}^{1.5}\right] l_i k_i \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

のように書き表わされる。したがって，交差点間で発生する総損失を求めるには，この S_i をその街路区間にあるすべての小区間について合計すればよいわけである。

なお，交通発生は交差点Cから300m上流の地点において，車が指数間隔で流入すると，ポアソンモデルを考えた。また，周期は100秒，スプリットは50%とする。

(2) シミュレーションの方法

まず，交通発生についてであるが，先に述べたように交通発生地点から指数間隔で流入するモデルを考えているので，いま，シミュレーション単位時間を t_0 秒とすれば，この時間内に発生する車の台数の確率分布はポアソン分布に従う。すなわち， t_0 秒間に k 台発生する確率を p_k とすると

$$p_k = \frac{(\lambda t_0)^k e^{-\lambda t_0}}{k!}$$

ただし， λ ：1秒間の交通量
のように与えられる。したがって，累積分布 $P(n)$ は

$$P(n) = \sum_{k=0}^n p_k = \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda t_0)^k e^{-\lambda t_0}}{k!}$$

となる。この $P(n)$ を n の適当な間隔ごとに計算して図示すると、たとえば図-2.4.2 のようになる。この図で、一例として n_2 台以下の車が発生する確率は $P(n_2)$ ということになる。

さて、いま一様乱数 r (ただし、 $0 \leq r \leq 1$) を発生させたとき

$$P(n_j) \leq r < P(n_{j+1})$$

なる関係が成り立つならば、 t_0 秒間の発生台数として、 $(n_j + n_{j+1})/2$ を考えるのである。

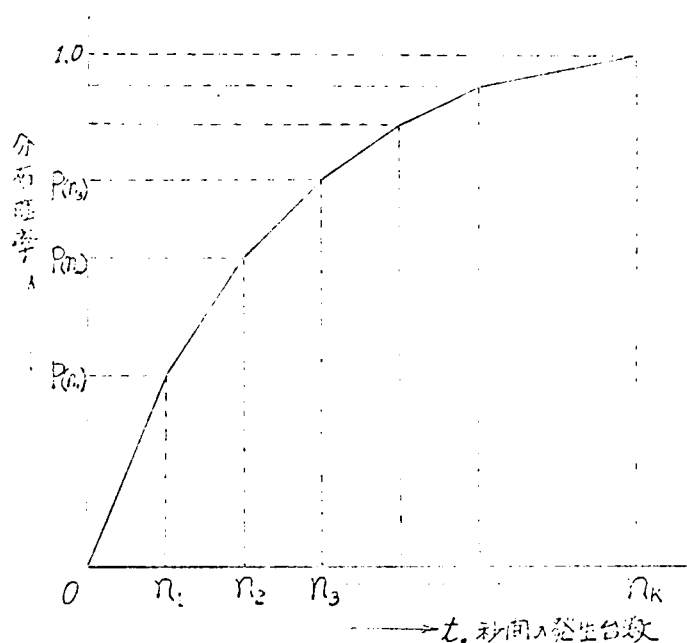


図-2.4.2 車の発生台数の確率分布

ここで問題となるのは、シミュレーションの単位時間が短い場合には、その間に発生し得る車の台数はおのずから限定されてしまい、当初仮定したような確率分布に従わなくなるおそれがあることで、ここではこのことを解決するために、 Kt_0 (K は正の整数) なる時間長さを考え、この間に発生する車の台数がポアソン分布に従おうとして、上に述べたような方法で発生台数を求め、この台数を K 個のシミュレーション単位時間にわたって乱数を用いて割り振るという方法を講じた。しろうろん、この場合でも Kt_0 という時間内での発生台数には、車の長さあるいは常識的に考えられる車間時隔を考慮すれば、

ある限度があるわけであるから、実際には変形されたポアソン分布を用いていることになる。

上述のような方法にしたがって、交通発生地点に隣接する小区間に存する車の台数、すなわち密度が与えられることになる。つぎに問題となるのは、こうして発生した交通をいかにして前方に進行させてゆくかである。この方法としては、先に述べたような密度速度曲線を利用するわけであるが、このことについて、もう少し詳しく説明しておこう。

そのために、いま隣接する2つの区間、すなわち第 i 区間と第 $(i+1)$ 区間を考え、それらの区間相互間の車の移動過程を考える。時刻 t のときの第 i 区間、第 $(i+1)$ 区間の密度を $\rho_i(t)$ 、 $\rho_{i+1}(t)$ とすると、それぞれの区間における車の速度 $v_i(t)$ 、 $v_{i+1}(t)$ は式(2.4.1)を用いて計算できるから、シミュレーションの単位時間後に区間全体として、車の移動する距離は図-2.4.3にも示したように、それぞれ $v_i(t) \cdot t$ 。

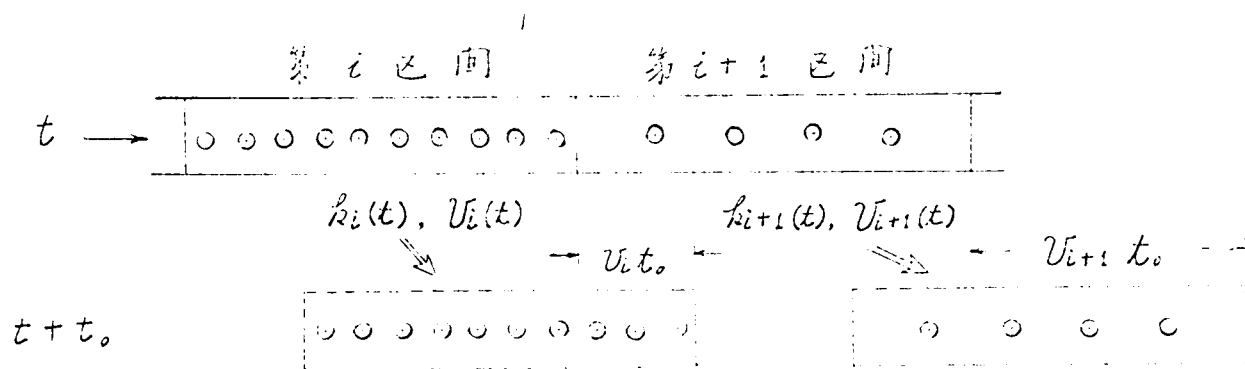


図-2.4.3 区間相互間の車の移動状態

および $v_{i+1}(t) \cdot t_0$ として求められる。換言すれば、第 $(i+1)$ 区間から流出してゆく車の台数は $v_{i+1}(t) \cdot t_0 \cdot \rho_{i+1}(t)$ となり、第 i 区間から流入してくる台数は $v_i(t) \cdot t_0 \cdot \rho_i(t)$ となる。ところで、シミュレーションの技術上、区間相互間の車の移動を

対象街路の最前方の区間から行なってゆくものとするれば，第 $(i+1)$ 区間からの流出台数については，いま問題外としても第 i 区間から第 $(i+1)$ 区間への移動車両については，はたして上で計算した台数 $v_i(t) \cdot t_0 \cdot k_i(t)$ がそのまま真の移動台数につながるか否かは，つぎのようなチェックルーチンをおさなければわからないのである。すなわち，まず第 $(i+1)$ 区間からの車の流出操作が終った時点における当刻区間の仮の密度を $k'_{i+1}(t)$ と表わすものとするとき，理論的にはこれに第 i 区間からの流入台数 $v_i(t) \cdot t_0 \cdot k_i(t)$ が加わって，全体として

$$k'_{i+1}(t) + \frac{v_i(t) \cdot t_0 \cdot k_i(t)}{l_{i+1}} \quad (= k''_{i+1}(t) \text{ とおく})$$

なる交通密度になるはずである。ところが，当該区間には車が無制限に入るわけではなく，ある一定の飽和密度がある。したがって，いまこれを \hat{k} で表わすものとするれば， $k''_{i+1}(t) \leq \hat{k}$ のときはいめて上で求めた第 i 区間からの流入台数が実際の流入台数になるものであり，そうでない場合には， $\{\hat{k} - k'_{i+1}(t)\} l_{i+1}$ 台だけが流入可能であって，残りの $[v_i(t) \cdot t_0 \cdot k_i(t) - \{\hat{k} - k'_{i+1}(t)\} l_{i+1}]$ 台は第 i 区間に留ることになるのである。

上述の移動過程は信号の影響を直接的に受けることのない区間相互間に対するものであるが，交差点に接する流入部の区間については別の方法を考えなければならない。すなわち，まず赤信号の場合には無条件に流出を許さない。また，青信号の場合には当該区間の密度が普通の走行状態に対応する値以上のときは，常に交差点容量に相当する台数を流出させるのである。

以上のような方法によって、発生した車はつぎつぎに街路上の小区間を前進してゆくこととなり、(1)で述べたようなモデルに従ったシミュレーションが可能となる。アウトプットは交差点間のオフセットに応じた当該街路区間の1周期あたりの総損失である。なお、シミュレーション時間は合計5周期とし、そのうち最初の2周期は過渡状態にあるものと考えて、分析対象から除外した。

(3) 街路区間相互の交通損失の独立性の検討

ある街路区間内で発生する交通損失は、その街路区間の両端交差点におけるオフセット、換言すればその街路区間に対応する相対オフセットのみに従属し、その他のあらゆる交差点のオフセットには独立であるということを、ここでは街路区間相互の交通損失の独立性と称するが、このことは信号制御システムを考える場合に、現在までに多くの研究者、技術者によって採用されてきた前提であり、また本研究においてもしばしばこの仮定を用いるので、先に述べたようなシミュレーションによって、まずこのことの検証を行なうことにする。もし、この仮定が成立することが明らかになれば、次章以降で取扱う系統オフセット設定の問題は非常に容易になるという利点があるのである。

そのために、まず a, b 間の相対オフセット θ_{ab} を一定値 0 に保ち、その状態で b, c 間の相対オフセット θ_{bc} を 10 秒おきに変え、そのときに交通量が a, b 間で被むる速度損失 S_{ab}^v がどのように変化するかをシミュレートしてみた。

シミュレーションの結果は図-2.4.4 に示したとおりであるが、これより交通量が 600 台/時 ~ 700 台/時 以上の場合については、上で述べた仮定がほぼ成立するとみなしてもよい

ことがわかる。

(4) 交通損失とオフセットの関係

このようにして、街路区間相互の速度損失の独立性がある限度以上の交通量について言えると、つぎに、両端交差点のオフセットにはいかなる影響を受けるかが問題となる。

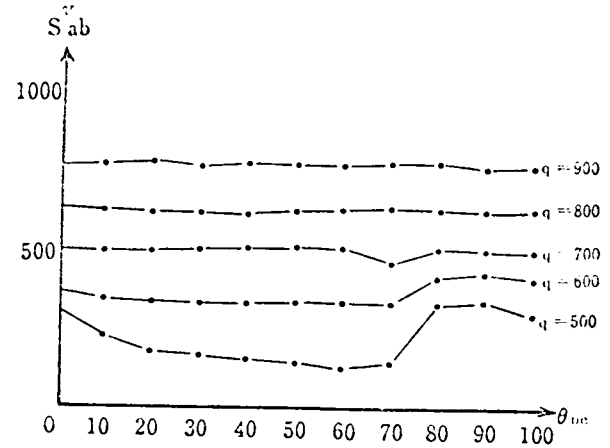


図-2.4.4 速度損失 S_{ab}^v と θ_{bc} の関係

このために、今度は b, c 間の相対オフセットを 0 に固定して、 a, b 間の相対オフセットを変化させた場合の S_{ab}^v の変化の状態を調べてみた。結果は図-2.4.5 のようになり θ_{ab} に極めて明確な影響を受けていることがわかる。

ところで、この図をみると S_{ab}^v と θ_{ab} の関係が、前節の数式モデルのところで検討したように余弦関数で表わされることが予想されるので、 $a(\varphi)$ および $b(\varphi)$ と φ の関係を調べてみると図-2.4.6 および図-2.4.7 のようになり、いずれも φ の一次式として表わされることがわかった。すなわち、

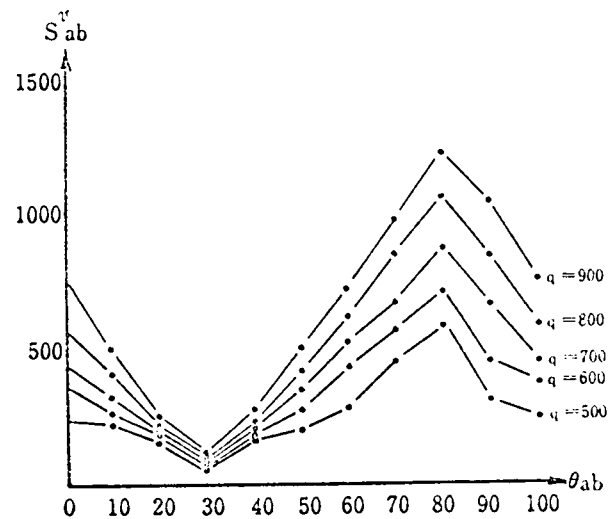
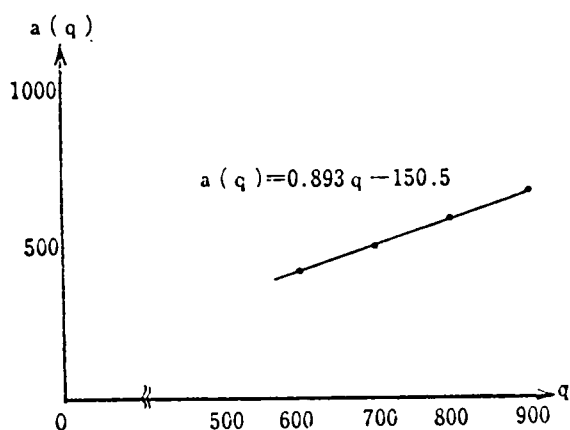
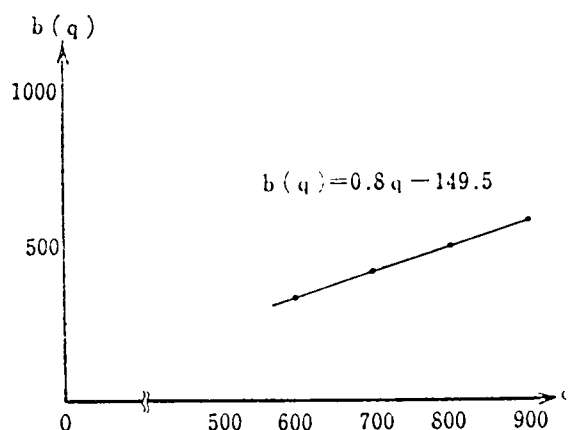


図-2.4.5 速度損失 S_{ab}^v と θ_{ab} の関係

$$a(\varphi) = 0.893\varphi - 150.5$$

$$b(\varphi) = 0.800\varphi - 149.5$$

したがって、 S_{ab}^v は具体的には

図-2.4.6 速度損失の $a(q)$ と q の関係図-2.4.7 速度損失の $b(q)$ と q の関係

$$S_{ab}^v = (0.893q - 150.5) - (0.800q - 149.5) \cos\left[\frac{2\pi}{C}(\theta_{ab} - \theta_{ab}^*)\right] \quad (2.4.4)$$

と書ける。

図みに、 $q = 900$ 台/時の場合について、式(2.4.4)によって描かれた曲線とシミュレーションから得られた値がどの程度符号しているかを見ると、図-2.4.8 のようになり、適合性は大体よいものと判断される。

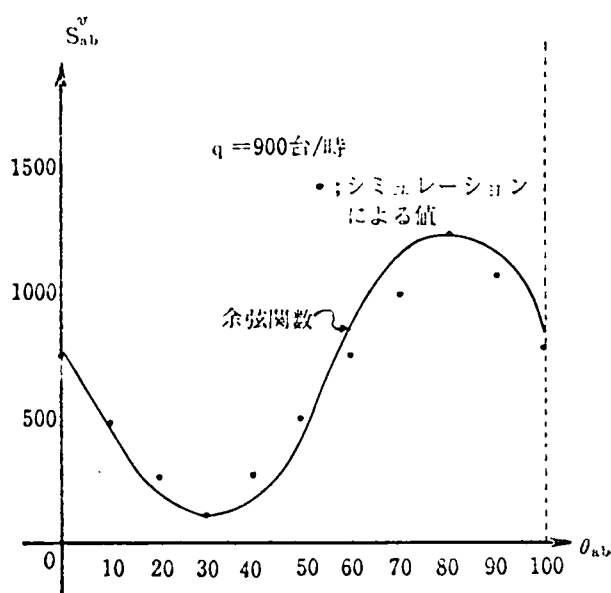


図-2.4.8 余弦関係の適合性

2.4.8 追従理論モデルによるシミュレーション

(1) シミュレーションのモデル

上に示したシミュレーションでは、車を集団としてとらえているので、50mの小区間内では車は一様に分布するとともに、一様の速度を持って動くという、いわば“流体的な取り扱い”をしたが、本モデルにおいては車を一台一台取り扱って、よりきめの細かい動きを表現できるようにする。

まず、交通発生については、本モデルでは車の一様到着を前提とするので問題はない。つぎに車の進行の表現方法であるが、ここではつぎのように考える。すなわち、まず先頭車は特別に走行を阻害する条件がないかぎり、原則として v_{max} ($= 50 \text{ km/時}$) で走行するものとする。交差点近くにさしかかって、信号現示が赤の場合にはある一定の距離（ここでは30m）手前より減速を開始し、停止線まで来て停止するものとする。減速のさせ方は、いま減速度を δ ($= 1.8 \text{ m/sec}^2$) とし、シミュレーション単位時間を1秒としたとき、時刻 t の速度 $v(t)$ と時刻 $t+1$ の速度 $v(t+1)$ の間に

$$v(t+1) = v(t) - \delta$$

なる関係をもたせることによって行なう。

また、信号待ちをしていた先頭車が、信号が青に変わって発進するときの加速のし方も、上述の減速の場合とまったく同様にして

$$v(t+1) = v(t) + \alpha$$

なる関係式を用いる。ここに、 α は加速度 ($= 1.6 \text{ m/sec}^2$) である。

つぎに、後続車の走行について考えてみよう。この場合は上に述べた先頭車の進行と若干その性格を異にする。すなわ

ち、後続車が刻々の動作を決定しようとするとき、必然的に先行車との間隔が、重要な要素となって入ってくるからである。交通量が少なく、しかも追越しが容易で自由に走行できるような場合には、先行車との間隔を後続車の動作規定要因として考えることは、それほど意味をもたないかもしれない。しかしながら、ここで問題とする御路においては交通量はかなり多く、また信号の影響で車は集団となって走行する傾向が強いので、1台の車の走行は先行車との間隔に強く影響されることが予想されることから、こうした考慮は必ずなされる必要がある。

さて、このような先行車との関連において後続車の行動を論ずる理論はすでに確立されており、追従理論とよばれているが、この理論に従うと、ある時刻 t における後続車の速度 $v_{k+1}(t)$ はつぎのような関係式で表わされる。⁽⁴⁸⁾

$$\tau v_{k+1}(t) + b_0 = x_k(t - \tau) - x_{k+1}(t - \tau)$$

ここに、 τ は運転者によって決まる定数で、一般に1と仮定される。 τ は反応時間で1秒と仮定する。 $v_k(t)$ は第 k 番目の車の時刻 t における速度であり、 b_0 は定数で停止時の車頭間隔と解釈することができる。ここでは、すべて小型車を考察の対象としているので、車長を $5m$ 、停止時における先行車との車間距離を $1m$ と仮定すれば b_0 は $6m$ となる。

$x_k(t)$ は時刻 t における先行車の座標、 $x_{k+1}(t)$ は当該後続車の座標である。上式の意味するものは、後続車が先行車の挙動に反応するのに、少なくとも反応時間だけの遅れを伴うことから、後続車の現在の速度は、反応時間前の先行車との車頭間隔に関係していることを表わしている。

その他の諸条件およびシミュレーションのケースについては、2.4.1の場合と同じものとする。ただし、交通損失については車が1台ずつ扱われているモデルであるから、待ち時間、停止回数および走行所要時間の三種をアウトプットするようにした。

(2) シミュレーションの方法

まず、1台の車の表現であるが、これは電子計算機の中ではその車の特性を示す一組のメモリーによって可能である。すなわち、本モデルでは車の特性として、その車の座標（交差点Aの流出口を原点とし、その原点から車が存する位置までの距離）、速度および地点到達時刻の3つを採り挙げるものとする。3つのメモリーによって車を表わすことが可能になるのである。この方法は、トラフィックシミュレーションの分野で、抽象的表現方式とよばれているものである。

このようにして車の表現が行なわれると、つぎにまず車の進行がいかんして行なわれるかであるが、このためにはつぎのようにして行なえばよい。(1)で説明したように、車の進行はいろいろな条件によってその方法が異なるために、一般的説明は困難であるが、現在その車がある条件下で、最も適した新しい速度をまず決め、その速度を座標から差し引いておけばよいのである。なぜならば、このことは当刻車が座標の原点である対象街路の流出口へ一歩近づいたことになり、これはとりも直さず車が進行したことを意味するからである。

つぎに、交通損失の計量の方法であるが、まず停止回数については速度を表わすメモリーが0になっている車をカウントすることによって簡単に行なうことができる。待ち時間については、上の停止回数の1周期にわたる累積台数として計

算できる。なぜならば、シミュレーションの単位時間を1秒にとっているから、ある時刻に N 台の停止車が存在したとすれば、それらの車はつぎのシミュレーション時間まではそのまま停止していることになるので、この間の待ち時間損失は $1 \times N$ すなわち N となるからである。最後に、走行所要時間については、たとえば、交差点 a , b 間であれば、交差点 b を流出した時刻をその車の地点到達時刻のメモリーに記憶し、その車が交差点 a を流出する場合に、そのときの時刻から、この記憶された値を差し引いたものを採ればよい。

(3) 街路区間相互の交通損失の独立性の検討

図-2.4.9 ~ 図-2.4.11に、 θ_{ab} 一定で θ_{bc} を変化させた場合のそれぞれの損失の変動状態を示したが、これらの図より、2.4.1の場合と同様に、交通量が600台/時以上になると、交差点 a , b 間で発生する交通損失は、 b , c 間の相互オフセット θ_{bc} によってあまり変化しないことがわかる。すなわち、車を1台1台取り扱う本シミュレーションモデルによっても、交通量が多い場合には街路区間相互の交通損失の独立性が成立すると言えるわけである。

(4) 交通損失とオフセットの関係

図-2.4.12 ~ 図-2.4.14は、 θ_{bc} 一定の条件下における θ_{ab} に対する各損失の変動状態を示したものである。これより、まず図-2.4.12の待ち時間と図-2.4.14の走行所要時間損失については余弦関数で表わされそうであるから、実際に $a(q)$ および $b(q)$ と q の関係を調べてみると、図-2.4.15 ~ 図-2.4.17のようになり、いずれの場合も厳密には2次曲線的変化をしているものの、交通量が600台/時 ~ 900台/時の範囲では近似的に q の一次式として表現される

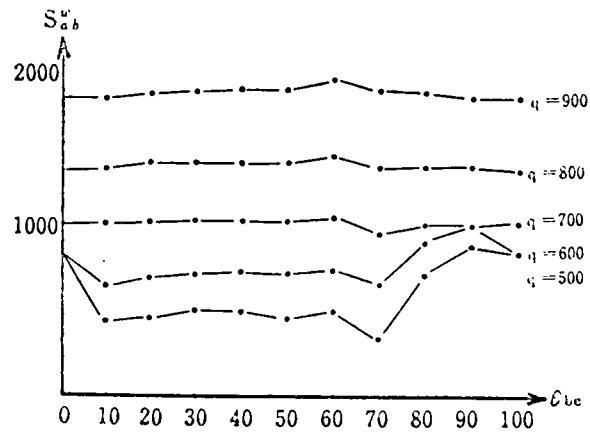


図-2.4.9 待ち時間損失 S_{ab}^w と θ_{bc} の関係

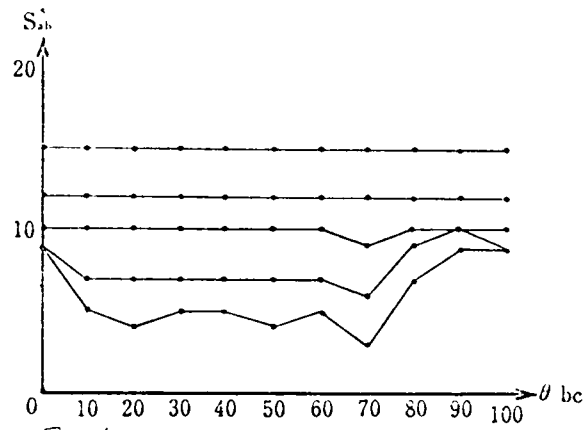


図-2.4.10 停止回数損失 S_{ab}^s と θ_{bc} の関係

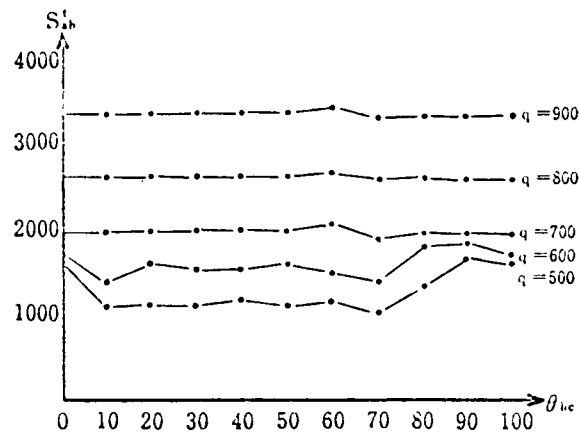


図-2.4.11 走行所要時間損失 S_{ab}^t と θ_{bc} の関係

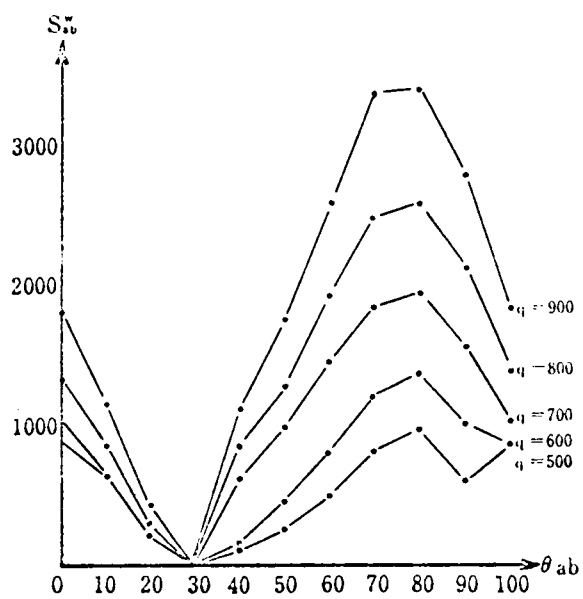


図-2.4.12 待ち時間損失 S_{ab}^w と θ_{ab} の関係

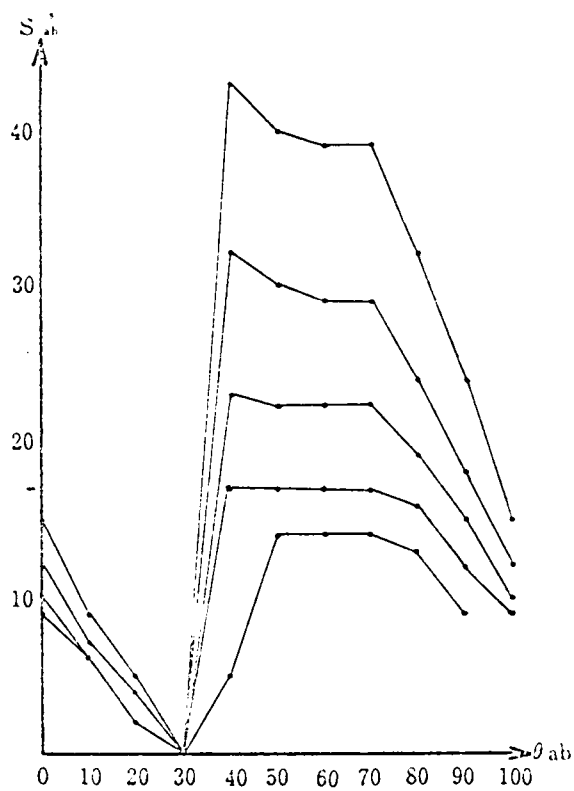


図-2.4.13 停止函数損失 S_{ab}^s と θ_{ab} の関係

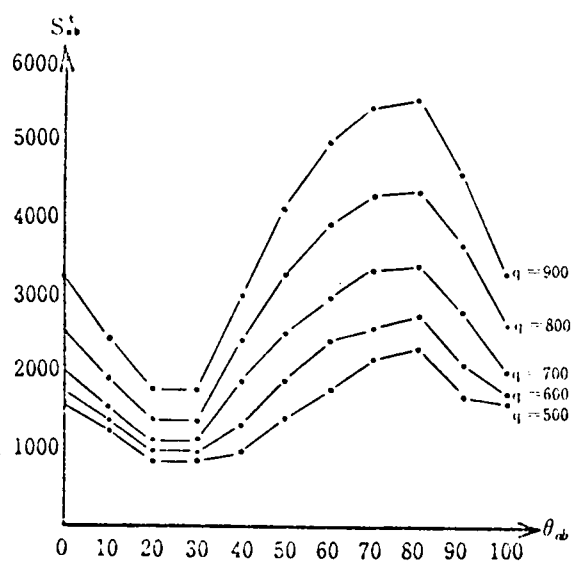


図-2.4.14 走行所要時間損失 S_{ab}^t と θ_{ab} の関係

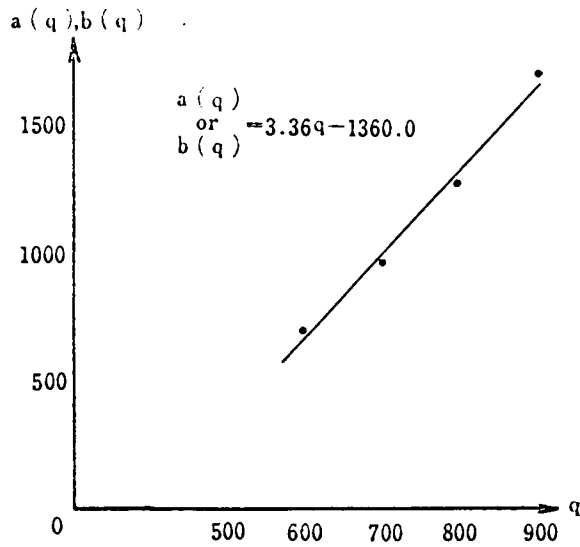


図-2.4.15 待ち時間損失の $a(q)$, $b(q)$ と q の関係

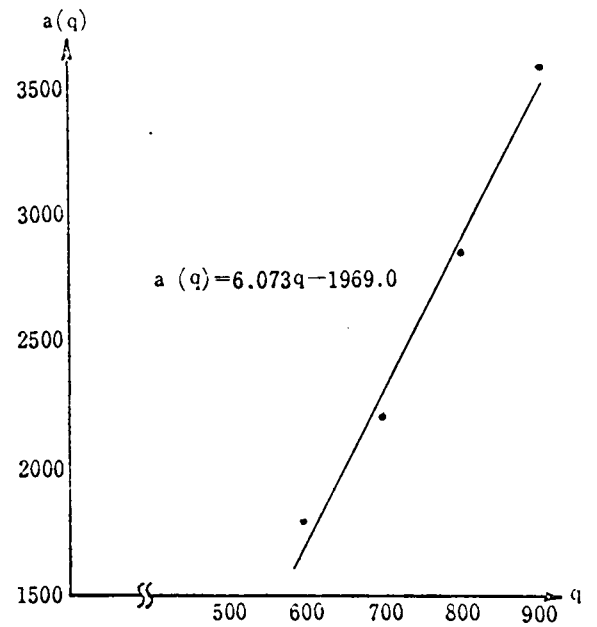


図-2.4.16 走行所要時間損失の $a(q)$ と q の関係

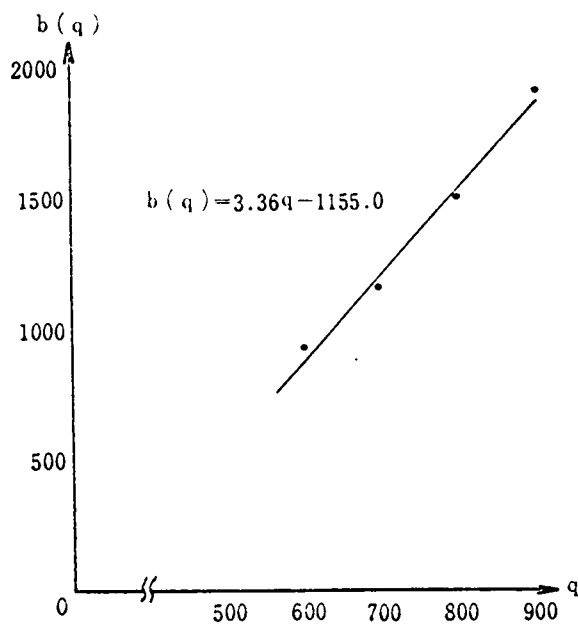


図-2.4.17 走行所要時間損失の $b(q)$ と q の関係

と考えてよいことがわかる。よって、先の式(2.4.4)に対応するものとして、まず待ち時間については

$$S_{ab}^w = (3.360g - 1360) - (3.360g - 1360) \cos\left[\frac{2\pi}{C}(\theta_{ab} - \theta_{ab}^*)\right] \quad (2.4.5)$$

なる関数を、また走行所要時間については

$$S_{ab}^t = (6.073g - 1969) - (3.360g - 1155) \cos\left[\frac{2\pi}{C}(\theta_{ab} - \theta_{ab}^*)\right] \quad (2.4.6)$$

なる関数をそれぞれ与えることができる。

一方、図-2.4.13の停止回数についてみると、この場合はかなり不規則な曲線を描いて変動しているので、上のように余弦関数をあてはめることは困難である。したがって、ここでは図-2.4.13を、まず図-2.4.18のような θ_{ab} が $0 \sim \theta_{ab}^*$

の範囲では右下りの直線、 $\theta_{ab}^* \sim \theta_{ab}^* + 10$ の範囲では右上りの直線、 $\theta_{ab}^* + 10 \sim \theta_{ab}^* + 40$ の範囲では一定、 $\theta_{ab}^* + 40 \sim C$ の範囲では $0 \sim \theta_{ab}^*$ に対応する直線と同じ傾きをもった直線(信号の周期性から $0 \sim \theta^*$ の左の隣接範囲の直線とこの直線が一致する可能性が強いから)のように、 θ_{ab} の範囲によって異なる不連続関数と仮定し、

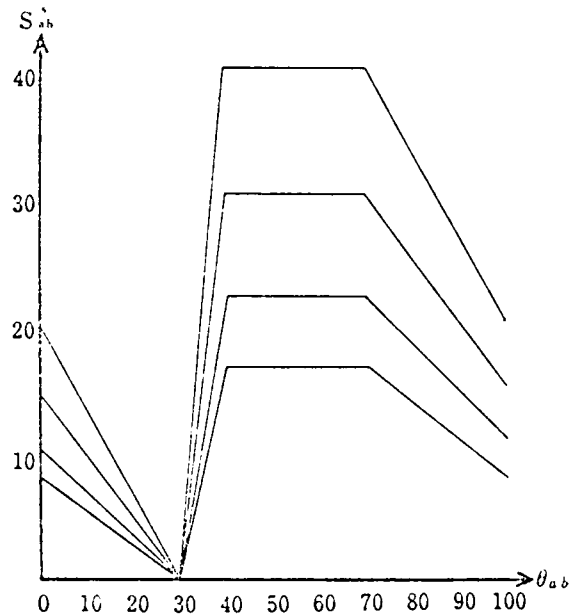


図-2.4.18 S_{ab} と θ_{ab} の修正曲線

これらの直線式を g との関連で決定することを考えた。このためには、図-2.4.18において、 $\theta_{ab}^* + 10 \sim \theta_{ab}^* + 40$ の範囲の最大の停止回数を g の関数として求めれば必要にして十分であろう。そこで、いまこの最大停止回数を $d(g)$ として g

との関係を調べてみると、図-2.4.19のように

$$d(q) = 0.0803q - 32.3 \quad (2.4.7)$$

なる一次式によってほぼ近似できることがわかった。

式(2.4.7)の $d(q)$ を利用するとおのおのの範囲における直線式が以下のように決定される。

1) $0 \leq \theta_{ab} < \theta_{ab}^*$ の場合、

$$\begin{aligned} S_{ab}^s &= \frac{0 - d(q)}{\theta_{ab}^* - (-30)} (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \\ &= \frac{-d(q)}{60} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \\ &= \frac{-(0.0803q - 32.3)}{60} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \end{aligned} \quad (2.4.8)$$

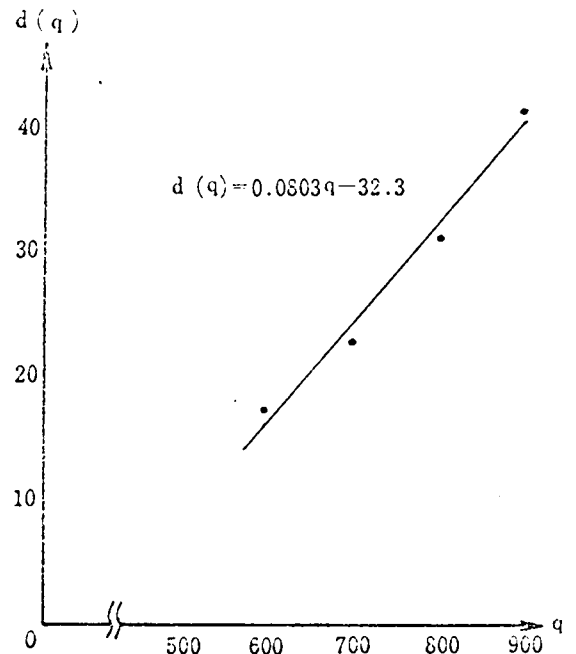


図-2.4.19 $d(q)$ と q の関係

2) $\theta_{ab}^* \leq \theta_{ab} < \theta_{ab}^* + 10$ の場合

$$S_{ab}^s = \frac{d(q)}{10} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) = \frac{(0.0803q - 32.3)}{10} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \quad (2.4.9)$$

3) $\theta_{ab}^* + 10 \leq \theta_{ab} < \theta_{ab}^* + 40$ の場合

$$S_{ab}^s = 0.0803q - 32.3 \quad (2.4.10)$$

4) $\theta_{ab}^* + 40 \leq \theta_{ab} < C$ の場合

この場合の直線式は、1) の直線式を単に θ_{ab} 軸に沿って右に C 平行移動したものであるから

$$S_{ab}^s = \frac{-(0.0803q - 32.3)}{60} \cdot (\theta_{ab} - C - \theta_{ab}^*) \quad (2.4.11)$$

となる。

2.4.3 スループバンドと交通損失の関係

猪瀬らによる、スループバンドと待ち時間の間の関係を、シミュレーションによって調べた研究⁴⁹⁾があるが、これによると、交差点容量の約20%以下の交通量に対しては、両者の間にはほぼ直線的な関係が成立するが、それ以上に交通量が多くなってくると、しだいに両者の関係はバラッキを示し始め、容量に近づくと両者はほとんど独立であるとみなしてもさしつかえない状態になる。

こうしたことは、従来からいわれていることをある程度科学的に裏づけるもので、2.2.7でも述べたように、スループバンドを、交通量が少ない場合の制御の評価規準とすることはさしつかえないとしても、交通量が多い場合に評価規準とすることは、ほとんど意味がないといえる。

2.5 オフセット変化による交通損失の観測例

2.5.1 観測方法

ヘリコプターによる航空写真撮影によって、実際の街路で発生する交通損失の特性を調べようとするものである。ヘリコプターを地上約1.8kmの高度にホバーリングさせ、10秒間隔で、30分にならって交通の流れを撮影する。撮影対象範囲は大阪駅付近2.5km四方の地域である。なお、調査は大阪都心交通制御システム研究委員会による。

ここで問題とすることは、前節のシミュレーションで検討した交通損失のオフセットに対する影響のしかたを、実現象で調べることにあり、そのために四ツ橋の堂島中町交差点の南北方向に対するオフセットを撮影途中で8秒変化させると

いう実験を行なった。すなわち、解析対象地域を図-2.5.1に示したが、これらの交差点のオフセットが、最初の3周期

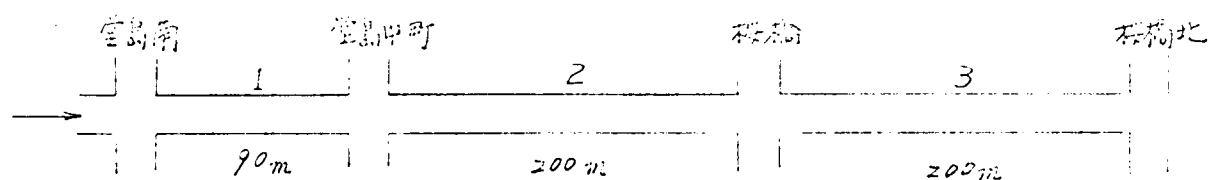


図-2.5.1 解析対象地域（大阪第四橋筋）

間は堂島南交差点の青信号の開始時刻を基準に、堂島中町で8秒、桜橋で24秒、桜橋北で26秒であったものを、つづく5周期間は堂島中町16秒、桜橋24秒、桜橋北26秒としたわけである（図-2.5.2参照）。ただし、周期は120秒である。これによって、堂島南—堂島中町間の相対オフセットは8秒から16秒に、堂島中町—桜橋間の相対オフセットは16秒から8秒に、それぞれ8秒ずつ増減するが、桜橋—桜橋北の相対オフセットは変らない。

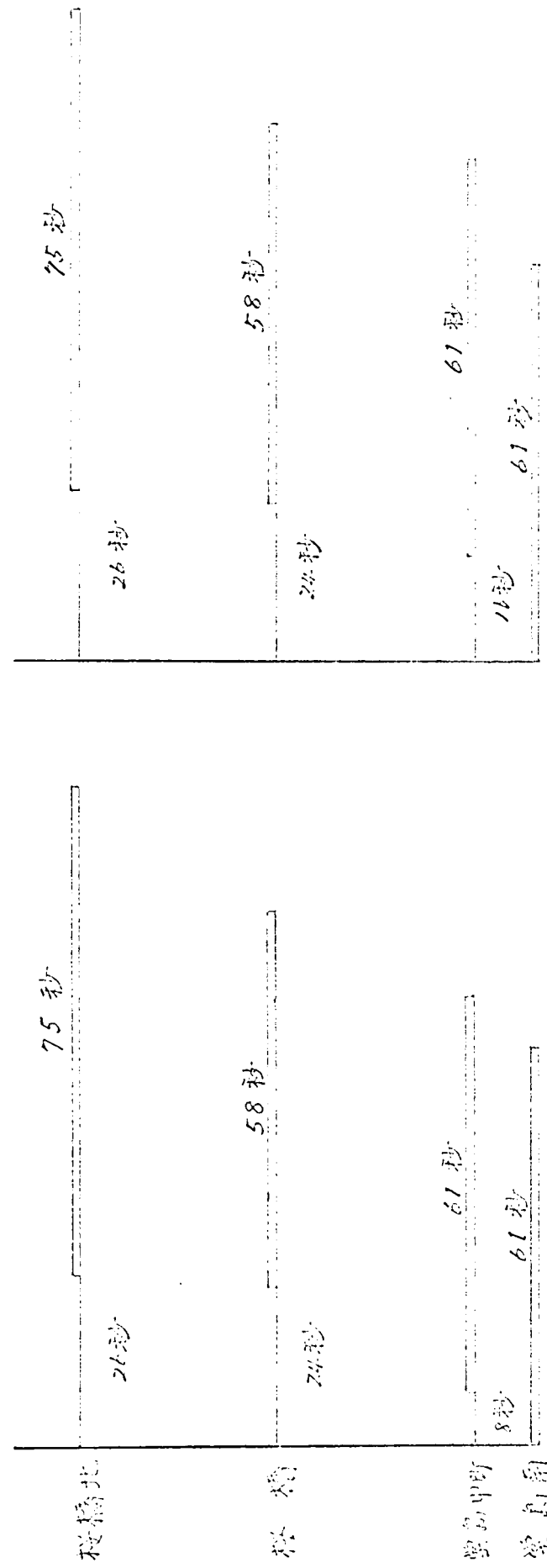
なお、交通量は撮影時間帯で約700台/時間・車線であった。

2.5.2 オフセット変化の待ち時間に対する影響

交通損失としては待ち時間を代表として採り挙げ、オフセット変更前後でどのように変化するかについて調べた。

待ち時間の算定方法は、もし航空写真が1秒ごとに撮られているならば、2.4.2で述べたように停止している車の累積台数として簡単に求められるが、ここでは10秒ごとの写真しか得ることができないので、つぎのような便宜的方法を考えた。すなわち、10秒ごとに停止台数をチェックしてゆき、その台数が急激に減少し始めた時点をもって赤信号が終了した時刻と考え、その時点より前すなわち赤信号の間の停止台

注)  ; 青信号
 周 期 ; 120 秒



(a) オフセット 変更前 (b) オフセット 変更後

図-2.5.2 信号対象地域のオフセット関係

数については10秒の待ち時間を対応させ、その時点より後の停止台数については5秒の待ち時間を対応させることとしたわけである。この方法は実現象における車の挙動を考えれば、明らかに誤りを犯す危険性をもつものであるが、10秒間隔の写真しかないという制約の下ではやむをえない手段である。

表-2.5.1に、上のようにして求めた待ち時間の、合計8周期にわたる変化を示した。本表において、区間番号は図-2.5.1の各街路区間の上に記した番号に対応している。これ

表-2.5.1 オフセット変更前後の待ち時間の変化

区間番号	1	2	3	4	5	6	7	8
1	150	450	330	40	60	130	130	40
2	1,170	1,200	1,510	2,520	2,120	1,810	1,980	1,830
3	700	680	720	1,010	950	920	920	720

オフセット変更前 ← → オフセット変更後

より、まず区間1ではオフセット変更によって待ち時間が大幅に減少していること、区間2では逆に待ち時間がかかり増加していること、および区間3ではやはり若干増加していること等の事実を読みとることが出来る。実際に第4周期から第6周期までをオフセット変更後の過渡状態と考えて、第1周期から第3周期までの平均値と第7周期から第8周期までの平均値とを比較してみると表-2.5.2のようになり、区間1における減少率は87%、区間2の増加率は47%、区間3の増加率は25%として計算された。

上のような解析結果より、堂島中町のオフセット変化によって直接相対オフセットが変わる区間では、それに伴って

待ち時間もかなり変化するが、直接的には相對オフセットが変化しない桜橋—桜橋北の区間で

表-2.5.2 平均待ち時間の比較

区間	項目	変更前	変更後	増減率(%)
1		310	40	-87
2		1,293	1,905	+47
3		700	875	+25

は待ち時間の变化はそれほど多くないといえる。したがって、実現象においても街路区間相互の交通損失の独立性が成立する可能性があることが予想される。しかしながら、オフセット変更が1回だけであり、かつ解析対象時間が短いいため、交通量の短時間内の変動の影響が平均化されない憂えもあり、上述の結論をそのまま受け入れられない反面はある。因みに堂島南交差点とその上流側の交差点の間の区間（この区間については、オフセット変更の影響は原則としてまったくないはずであるか）に対して、同様な解析を行なってみると待ち時間はかなりの程度変化していた。

このようなことから、実現象における交通損失とオフセットの関係を調べるためには、もう少し長い時間にならって詳細な実験、調査を行なうことが不可欠の要件であるといえよう。

2.6 結語

以上、信号制御の評価基準について基本的な検討を加えたが、数式モデルによっても、シミュレーションによってもある街路区間で発生する交通損失と当該区間に対応する相對オフセットの関係は、最大値と最小値が1つつつ存在するような余弦関数的曲線になるということがわかったことは興味あ

ることである。もちろん、おのおののモデルによって同一の交通損失でもその計算の形は異なっているわけであるが、制御との関連で考えれば、曲線の厳密な形よりも、いかなるオフセットのときにその交通損失値が増大あるいは減少するかということが重要なことであるから、さしたる問題ではないと考えられる。

数式モデルによる曲線とシミュレーションによる曲線の相違は、根本的には数式モデルにおいては、右左折車が混入した車群の観測結果から交差点への流入交通量波形を与えているのに対し、シミュレーションでは直進車のみを対象としていること、数式モデルにおいては車の加減速の過程を導入することが困難であることの2つの事実に起因している。

また、ここでは交通損失とオフセットの関係を余弦関数という簡単な既知関数で表わすことを試みたが、これは後章での計算に資するためのものである。

さらに、2つのシミュレーションによって、従来まで重要な仮定として用いられていた街路区間相互の交通損失の独立性が実証できたことも成果の1つであった。これによって、次章以降で取り扱うオフセットパターン決定のための解析が非常に容易となるのである。

本章で用いた2つのモデルは、両者ともに右左折車をまったく考慮しないといういわば極端なケースであり、当初はこれによって独立性の実証できるとは予想していなかった。また、2つのモデルにおいて、車を取り扱いかい方が完全に異なっているにもかかわらず、シミュレーションの結果がほとんど同じ傾向を示したことは興味深いことであった。

車群パターンの観測データからも明らかのように、街路

区間途中における交通の発生および吸収はその区間の車群をかなり攪乱する要素をもっているので、このような状況をシミュレーションのモデルに導入すれば、交通量が比較的少ない場合でも街路区間相互の交通損失の独立性が成り立つ可能性もある。なぜならば、バスあるいはタクシーの停車および発車、自家用車の駐車、区間途中の小街路からの流入等、交通の流れに攪乱作用を及ぼす不確定要素は極めて多いのに、隣接区間の相対オフセットが直接敏感に当該区間の交通損失に影響をもたらすとは考えられないからである。

スループントと交通損失の関係については、一般にいわれているように、交通量が多い場合には、スループントの大小と待ち時間との関係がないということが猪瀬らの研究によってわかっており、スループントという評価規準の1つの限界が明白にされたことは、制御システムを考える上で意義あることである。

航空写真による待ち時間の性質の検討は、本文中にも述べたようにオフセット変更点が1点のみであり、また撮影時間がそれほど長くないので、分析結果が果して偶然変動によるものか、オフセットの影響によるものか判別しにくい面があるが、およその傾向はシミュレーションの結果を支えるものであったといえよう。

交通損失の性質およびそのオフセットとの関係は、実際の街路区間における詳細な観測および実験（航空写真撮影を含めて）をとおして初めてその本質が明らかになるものと思われる。今後のより一層の研究が望まれる。

第3章 路線系統を基盤とした制御

3.1 概説

信号を制御するという場合には、一般には信号の周期、スプリットおよびオフセットの3つの制御パラメーターの合理的設定を意味する。この周期の設定は単独交差点の場合は別としても、一連の交差点信号を相互のオフセットの関連を考慮しつつ制御するいわゆる系統制御の場合においては、周期の統一ということが大前提となるので、対象交差点群の中で最も交通需要の大きい交差点の信号周期をまず決め、それにしたがって他のすべての交差点の周期を設定するというように、問題は比較的単純化されてしまう。つぎに、スプリットであるが、この設定の基本的態度としては交差点に集中する各方向別の交通需要に応じてその方向に青信号時間を配分するということであるから、方向別の交通需要の把握のみが条件であり、方法論的には極めて単純な問題であるといえよう。

したがって、複数の交通信号をその相互関連に重きをおいて制御するという系統制御の本質からいえば、オフセットの設定が最も興味ある問題となるのである。

このような理由から、本研究では、3つの制御パラメーターのうち、オフセットのみに注目し、その最適設定ということに問題を限定して考える。

ところで、一般に路線系統を基盤とした信号制御には2つの方向がある。その1つは、街路網から適当に選ばれたチェーン状の一連の交差点にたいし、オフセットを設定するといういわゆる路線系統制御である。この方法は、現在各国で一般的に用いられる方法である。他の1つは、このようなチェーンを幾本か連結した形で、路線相互の関連を考慮しつつ、

オフセット設定を行なうという、いわゆるツリー形成方式による制御である。ここに、ツリーという名称は、何本かの路線を連結して考える場合に、それらの路線がループを構成しないようにするため、結果として形成される路線網は、グラフの理論でツリーと称する網になるということに基づいている。東京の広域制御にこのツリー形成方式がとり入れられている。

本章では、上述のような2つの方向に沿ってオフセットの最適設定の方法について検討する。まず路線系統制御に関しては、スループバンド最大規準によるオフセット設定法および交通損失最小規準によるオフセット設定法を示し、つぎに車群の再編成をねらったオフセット設定法についても言及する。

ツリー形成による制御については、交通損失を評価規準とし、与えられた街路網から最も制御効果の大きいツリーを選び出す方法とあわせてオフセット設定を行なう方法について述べる。

3.2 動的計画法を用いたスループバンド最大化の手法

本節では、路線系統制御におけるスループバンド最大規準によるオフセット設定の問題について考える。スループバンドを最大にする信号制御は、車が複数の交差点を停止することなく連続して通過できる青信号の幅を最大にするにより、効率的な交通処理を行なおうとする制御方式であるが、前にも述べたように、この考え方には、車が待ち行列を形成すること、およびその待ち行列が発進するときに反応時間遅れを伴うこと等の要素が入っていないために、交通量が少ない場合以外にはあまり有効でない方式である。

スループントを最大にする方法については第1章で述べたように、多数の研究者、技術者が研究を行なっているが、ここでは動的計画法 (Dynamic Programming 略して DP) を用いた新たな手法を以下において示すことにする。

いま図-3.2.1に示したような N 個の交差点を含む二方向通行路線に対してスループントを最大にすることを考える。このために、まず第 i 交差点と第 $(i+1)$ 交差点の間の関係について考察する。



図-3.2.1 スループント最大のための対象路線

さて、いま

G_i ; 第 i 交差点の青信号時間

R_i ; 第 i 交差点の赤信号時間

C ; 周期

$L_{i,i+1}$; 第 i 交差点と第 $(i+1)$ 交差点の間の距離

$v_{i,i+1}^u$; 第 i 交差点から第 $(i+1)$ 交差点に向かう車の速度

$v_{i,i+1}^d$; 第 $(i+1)$ 交差点から第 i 交差点に向かう車の速度

(以下、右上の添字 u と d の使い分けはこの v の定義に準ずるものとする)

θ^i ; 第 i 交差点を基準とした第 $(i+1)$ 交差点の u 方向交通に対する相対オフセット

δ_i^u ; 第 i 交差点青信号開始時から当該交差点のスループント開始時点までの時間長さ (δ_i^d については、

スループバンド終了時点から、青信号終了時点までの時間長さとする)

B_i^u ; 第 i 交差点の u 方向交通に対するスループバンドなる記号を定義し、両交差点の間に成立するあらゆる関係について調べてみる。

1) $\theta \leq \theta^i < R_{i+1}$ の場合

[B_{i+1}^u の計算]

δ_i^u が第 i 交差点における青信号開始時からのスループバンドの始点までの時間長さであり、 $\frac{L_{i,i+1}}{v_{i,i+1}^u}$ が両交差点間の車の走行所要時間であることを考えると、これらの和($\delta_i^u + \frac{L_{i,i+1}}{v_{i,i+1}^u}$)は第 i 交差点の青信号開始時刻を基準としたスループバンドの始点の第 $(i+1)$ 交差点信号現示における位置を表わすものと解される(図-3.2.2参照)。以下ではこの位置によって、

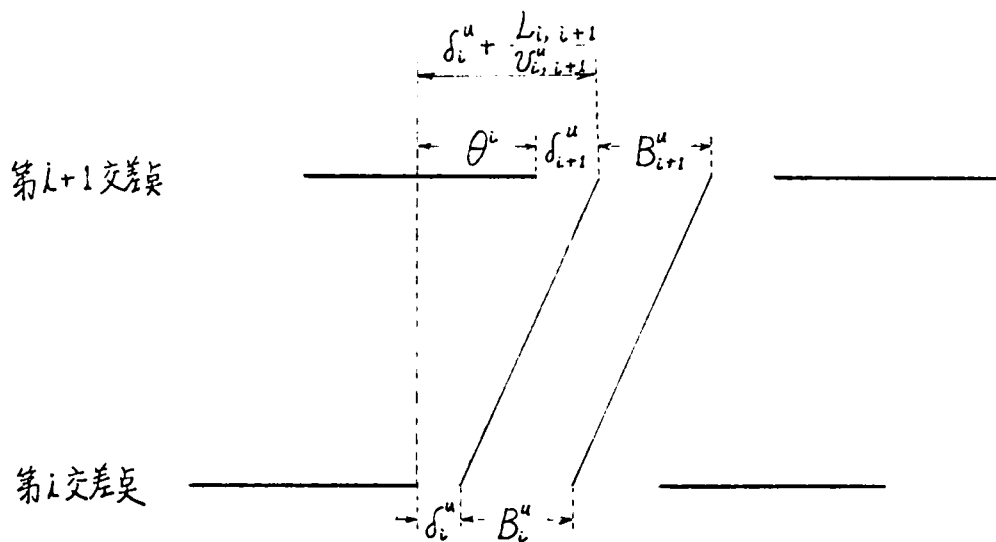


図-3.2.2

B_{i+1}^u がいかんとして計算されるかを検討する。ただし、両交差点の間の距離 $L_{i,i+1}$ が大きい場合等に、上に示した値が信号周期 C を上回る可能性があるが、こうした場合には、いま

$$\alpha = \delta_i^u + \frac{L_{i,i+1}}{U_{i,i+1}^u}$$

とおいたときに,

$$\alpha = \alpha - \left[\frac{\alpha}{C} \right] \cdot C$$

ただし, $[X]$ は X を上回らない最大の整数なる変換を行ない, 必ず $\alpha < C$ なる関係が成立つようにしておく。これは信号の周期性を考えれば当然許されることであり, かつ問題を簡単化するために役立つことである。

(i) $\delta_i^u + \frac{L_{i,i+1}}{U_{i,i+1}^u} \geq \theta_i$ の場合

いま

$$\varepsilon_{i+1}^u = \delta_i^u + \frac{L_{i,i+1}}{U_{i,i+1}^u} - \theta_i$$

とおくと, $\varepsilon_{i+1}^u \geq 0$ となるが, これを用いて B_{i+1}^u が, 以下の様な場合に命かれてそれぞれ計算できる。

$$A. \quad \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u < G_{i+1}$$

図-3.2.2 に示されたような場合でありこの場合は明らかに

$$B_{i+1}^u = B_i^u$$

となる。また

$$\delta_{i+1}^u = \varepsilon_{i+1}^u$$

である。

$$B. \quad \varepsilon_{i+1}^u < G_{i+1} \text{ かつ } G_{i+1} \leq \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u \leq C$$

この場合の B_{i+1}^u は B_i^u より狭められ

$$B_{i+1}^u = G_{i+1} - \varepsilon_{i+1}^u$$

となる。また

$$\delta_{i+1}^u = \varepsilon_{i+1}^u$$

$$C. \quad \varepsilon_{i+1}^u < G_{i+1} \quad \text{かつ} \quad \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u > C$$

B_i^u なるスルーバンドは第 $(i+1)$ 交差点で 2 個のスルーバンドに分断される。そのうちの第 1 交差点青信号開始時刻に対し最初の青信号時間に対応するものを右上添字 1 で表わし, またつぎの青信号時間に対応するものを右上添字 2 で表わすことにすると, まず B_{i+1}^{u1} は上の B の場合と同様にして

$$B_{i+1}^{u1} = G_{i+1} - \varepsilon_{i+1}^u$$

$$\delta_{i+1}^{u1} = \varepsilon_{i+1}^u$$

のように求められる。

一方, $B_{i+1}^{u2}, \delta_{i+1}^{u2}$ は

$$B_{i+1}^{u2} = \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u - C$$

$$\delta_{i+1}^{u2} = 0$$

ところで, C の場合と A, B のようにスルーバンドが分断されない場合とを後の計算過程に備えて識別しておくことが必要である。そこで e_i^u なる変数を導入し,

$$A, B \text{ の場合} \quad e_{i+1}^u = 1$$

$$C \text{ の場合} \quad e_{i+1}^u = 2$$

のようにする。

$$D. \quad G_{i+1} \leq \varepsilon_{i+1}^u < C - \theta^i \quad \text{かつ} \quad \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u \leq C$$

この場合はスル－バンドは第 $(i+1)$ 交差点において消滅する。

$$B_{i+1}^u = 0$$

また当然ながら

$$e_{i+1}^u = 1$$

$$E. \quad G_{i+1} \leq \varepsilon_{i+1}^u < C - \theta^{i+1} \quad \text{かつ} \quad \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u > C$$

この場合には、第 i 交差点の青信号開始時刻を基準にして、第 2 番目の青信号時間にスル－バンドが対応することになる。

$$B_{i+1}^u = \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u - C$$

$$\delta_{i+1} = 0$$

$$e_{i+1}^u = 1$$

ところで、先にも述べたがある交差点に対するスル－バンドの状態としては、 e なる変数が 1 の場合と 2 の場合の 2 つのケースが考えられる。上での B_{i+1}^u の計算はすべて $e_i^u = 1$ 、すなわち第 i 交差点に対応するスル－バンドがまったく分断されない場合のみを対象としている。したがって、つぎに $e_i^u = 2$ の場合には B_{i+1}^u はいかにして計算すればよいかについて述べておこう。

この場合は第 $(i-1)$ 交差点と第 i 交差点の間に上記 C の場合が生じていると解釈できるから、

$$0 < \delta_i^{u1} < G_i \quad (3.2.1)$$

$$\delta_i^{u2} = 0 \quad (3.2.2)$$

となることは明らかである。また、第 $(i-1)$ 交差点に対応するスループントは G_{i-1} を越えないから

$$B_i^{u1} + R_i + B_i^{u2} \leq G_{i-1} \quad (3.2.3)$$

が成立する。

したがって、この場合の B_{i+1}^u の計算は上に示した3つの条件を考慮して、 $e_i^u = 1$ の場合と同様の計算を2回行なえばよい。このとき

$$e_{i+1}^u = 2$$

は当然であろう。

(ii) $\delta_i^u + \frac{L_{i,i+1}}{v_{i,i+1}^u} < \theta^i$ の場合

図-3.2.3 に示したように、第 i 交差点に対するスループ

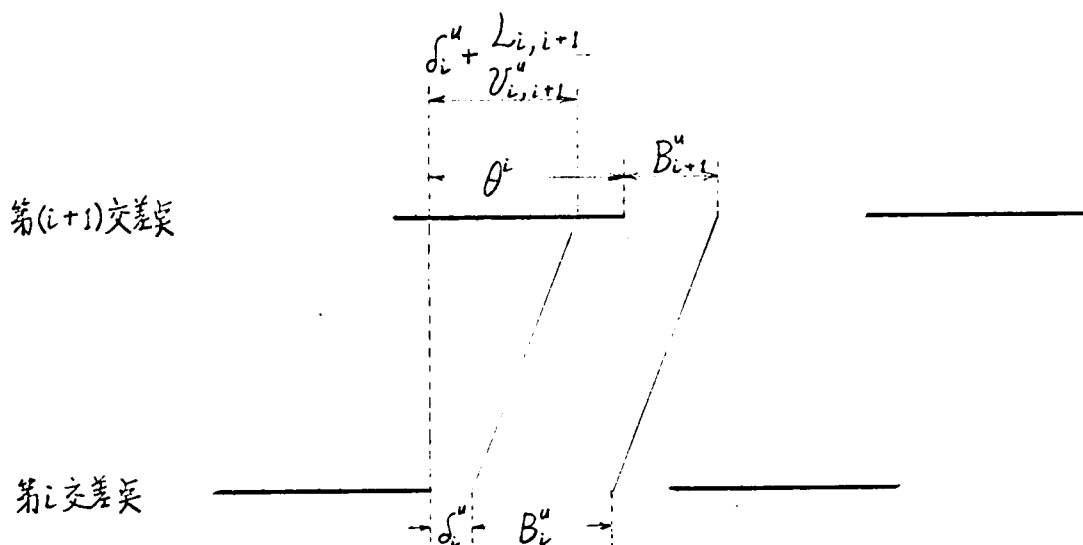


図-3.2.3

ントの始点が最初の赤信号内におちる場合である。ただし、 $e_i^u = 1$ とする。

(i)と同様に ε_{i+1}^u を与えると $\varepsilon_{i+1}^u < 0$ となるが、これを用いて B_{i+1}^u はつぎのように計算される。

$$A. \quad \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u \leq 0$$

この場合は B_i^u はすべて R_{i+1} 内に含まれ、スルーバンドは完全に消滅する。

$$B_{i+1}^u = 0$$

$$e_{i+1}^u = 1$$

$$B. \quad 0 < \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u < G_{i+1}$$

この場合には

$$B_{i+1}^u = \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u$$

$$\delta_{i+1}^u = 0$$

$$e_{i+1}^u = 1$$

となる。

$$C. \quad \varepsilon_{i+1}^u + B_i^u \geq G_{i+1}$$

この場合は B_i^u の中に G_{i+1} が含まれてしまうから

$$B_{i+1}^u = G_{i+1}$$

$$\delta_{i+1}^u = 0$$

$$e_{i+1}^u = 1$$

となる。

以上は $e_i^u = 1$ の場合であるが、 $e_i^u = 2$ の場合は条件式 (3.2.1)

～(3.2.3)を考慮して上と同様の検討をすれば B_{i+1}^u が求められる。

[B_{i+1}^d の計算]

B^d の計算については意味的には交通の流れる方向に沿って第 $(i+1)$ 交差点を基準に第 i 交差点に対応するスループバンドを求めるようにすべきであるが、後述するスループバンドの最大化の計算過程に対しては、 B^u と同じように第 i 交差点が基準となっていた方が便利である。

B^u の計算における考え方と同じ考え方にたって以下のような場合に分けて考察する。

(i) $\delta_i^d + \frac{L_{i,i+1}}{v_{i,i+1}^d} \geq G_i^d + R_{i+1}^d - \theta_i^d$ の場合

図-3.2.4 のような場合がその一例である。いま、

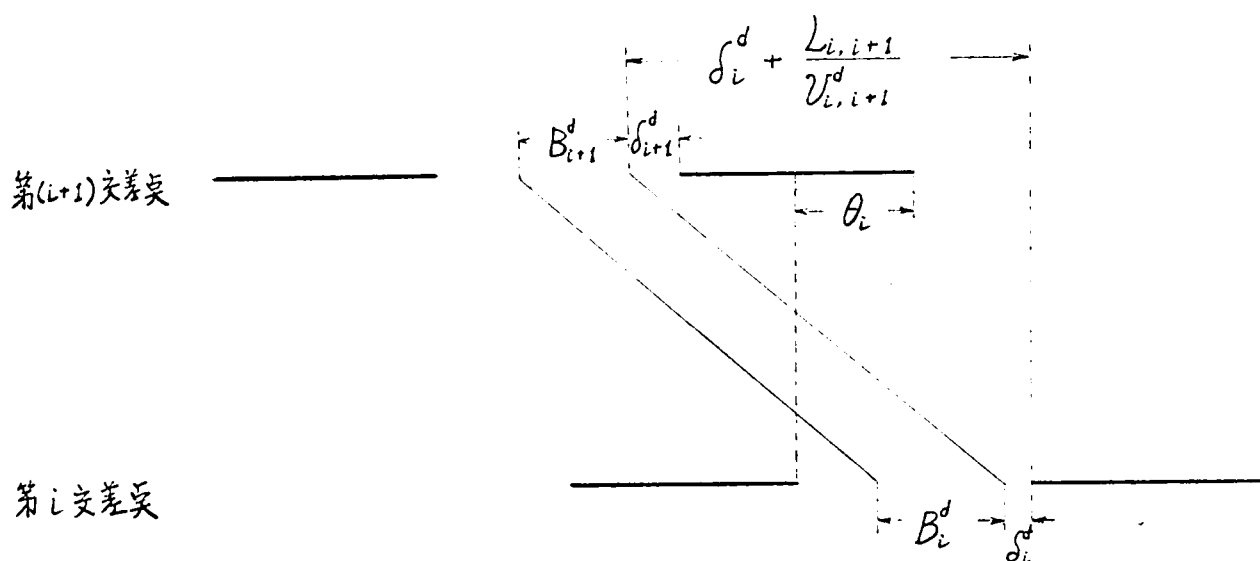


図-3.2.4

$$E_{i+1}^d = \left(\delta_i^d + \frac{L_{i,i+1}}{v_{i,i+1}^d} \right) - (G_i^d + R_{i+1}^d - \theta_i^d)$$

とすると $E_{i+1}^d \geq 0$ である。

A. $E_{i+1}^d + B_i^d < G_{i+1}^d$

$$B_{i+1}^d - B_i^d$$

$$\delta_{i+1}^d = \varepsilon_{i+1}^d$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

$$B. \quad \varepsilon_{i+1}^d < G_{i+1} \quad \text{かつ} \quad G_{i+1} \leq \varepsilon_{i+1}^d + B_{i+1}^d \leq C$$

$$B_{i+1}^d = G_{i+1} - \varepsilon_{i+1}^d$$

$$\delta_{i+1}^d = \varepsilon_{i+1}^d$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

$$C. \quad \varepsilon_{i+1}^d < G_{i+1} \quad \text{かつ} \quad \varepsilon_{i+1}^d + B_i^d > C$$

B_i^d が第 $(i+1)$ 交差点において 2 つのスルーバンドに
分断される場合である。 B_{i+1}^u の計算で使った記号表示に
従うことにすると

$$B_{i+1}^{d1} = G_{i+1} - \varepsilon_{i+1}^d$$

$$\delta_{i+1}^{d1} = \varepsilon_{i+1}^d$$

さらに

$$B_{i+1}^{d2} = \varepsilon_{i+1}^d + B_{i+1}^d - C$$

$$\delta_{i+1}^{d2} = 0$$

となる。また

$$e_{i+1}^d = 2$$

である。

B_{i+1}^u の計算の場合と同様に, $\delta_i^d + \frac{L_{i,i+1}^d}{v_{i,i+1}^d} < C$ とすれば (1)

のケースとしては上記の A ~ C までの3つのみである。

(ii) $\delta_i^d + \frac{L_{i,i+1}}{v_{i,i+1}^d} < G_i + R_{i+1} - \theta^i$ の場合

スループバンドの始点が基準時を含む赤信号以降の現示内におちる場合である。一例として図-3.2.5のような場合が考えられる。

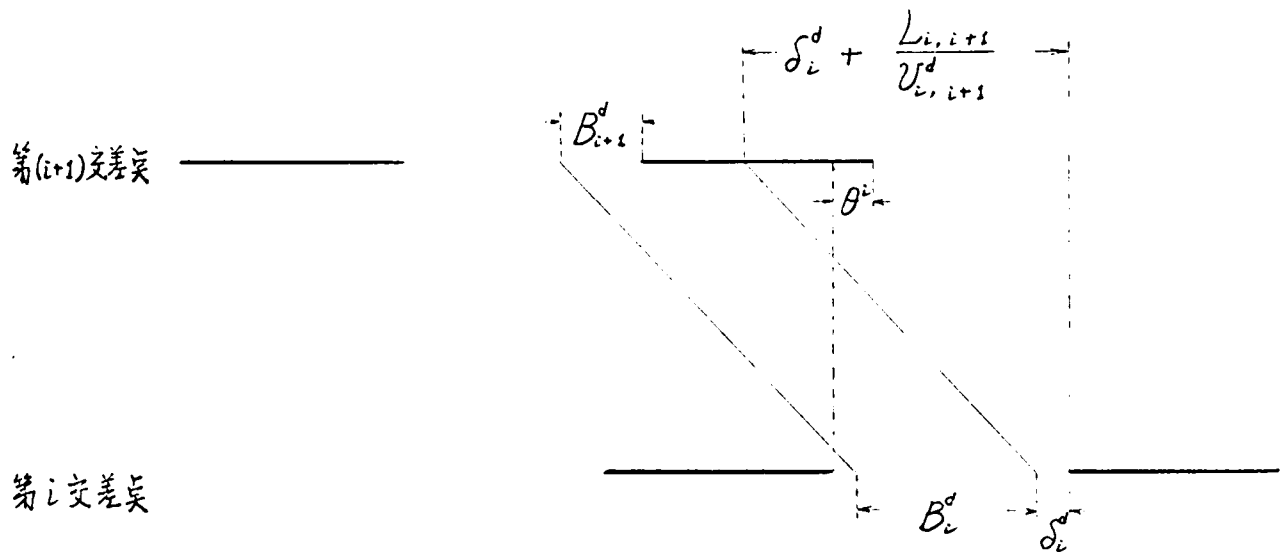


図-3.2.5

さて、いま ε_{i+1}^d として (i) と同様のものを考えとつぎのような場合に分けて B_{i+1}^d が求められる。

A. $-\varepsilon_{i+1}^d \leq R_{i+1}$ かつ $\varepsilon_{i+1}^d + B_i^d > 0$

図-3.2.5 の場合である。

$$B_{i+1}^d = \varepsilon_{i+1}^d + B_i^d$$

$$\delta_{i+1}^d = 0$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

B. $-\varepsilon_{i+1}^d \leq R_{i+1}$ かつ $\varepsilon_{i+1}^d + B_i^d \leq 0$

この場合には第(i+1)交差点でスループバンドはなくな

$$B_{i+1}^d = 0$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

となる。

$$C. \quad -\varepsilon_{i+1}^d > R_{i+1} \quad \text{かつ} \quad \varepsilon_{i+1}^d + B_i^d > 0$$

この場合には B_i^d が R_{i+1} を含み、スループバンドは分断される。

$$B_{i+1}^{d1} = -\varepsilon_{i+1}^d - R_{i+1}$$

$$\delta_{i+1}^{d1} = C + \varepsilon_{i+1}^d$$

また,

$$B_{i+1}^{d2} = \varepsilon_{i+1}^d + B_i^d$$

$$\delta_{i+1}^{d2} = 0$$

となる。さらに

$$e_{i+1}^d = 2$$

である。

$$D. \quad R_{i+1} < -\varepsilon_{i+1}^d < C \quad \text{かつ} \quad -(\varepsilon_{i+1}^d + B_i^d) < R_{i+1}$$

$$B_{i+1}^d = -\varepsilon_{i+1}^d - R_{i+1}$$

$$\delta_{i+1}^d = C + \varepsilon_{i+1}^d$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

$$E. \quad R_{i+1} < -\varepsilon_{i+1}^d < C \quad \text{かつ} \quad -(\varepsilon_{i+1}^d + B_i^d) \geq R_{i+1}$$

$$B_{i+1}^d = B_i^d$$

$$\delta_{i+1}^d = C + \varepsilon_{i+1}^d$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

$$F. \quad -\varepsilon_{i+1}^d \geq C \quad \text{かつ} \quad -(\varepsilon_{i+1}^d + B_i^d) < R_{i+1}$$

$$B_{i+1}^d = G_{i+1}$$

$$\delta_{i+1}^d = 0$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

$$G. \quad -\varepsilon_{i+1}^d \geq C \quad \text{かつ} \quad -(\varepsilon_{i+1}^d + B_i^d) \geq R_{i+1}$$

$$B_{i+1}^d = C + \varepsilon_{i+1}^d + B_i^d$$

$$\delta_{i+1}^d = 0$$

$$e_{i+1}^d = 1$$

以上の B_{i+1}^d の計算は $e_i^d = 1$, すなわち第 i 交差点に対応するスループントが 2 つに分断されていない場合であるが, $e_i^d = -2$ の場合には

$$0 < \delta_i^{d1} < G_i$$

$$\delta_i^{d2} = 0$$

および

$$B_i^{d1} + R_i + B_i^{d2} \leq G_{i-1}$$

なる条件を考慮して $e_i^d = 1$ と同様の操作を 2 回行なえばよい。

このようにして $0 \leq \theta^i < R_{i+1}$ の場合のあらゆるケースに対し B_{i+1}^u および B_{i+1}^d が計算されることになる。

2) $R_{i+1} \leq \theta^i < C$ の場合

[B_{i+1}^u の計算]

いま,

$$\varepsilon_{i+1}^u = \delta_i^u + \frac{L_{i,i+1}}{U_{i,i+1}^u} - \theta^i$$

とおくとき, $\varepsilon_{i+1}^u \geq 0$ ならば, 1) の (i) と条件はまったく同じになるから, B_{i+1}^u の計算も同一方法によればよい. ただし, ε_{i+1}^u は上式第2項までの和が C より小さくなるように操作していいので,

$$0 \leq \varepsilon_{i+1}^u < C - \theta^i$$

なる範囲にある (図-3.2.6 参照).

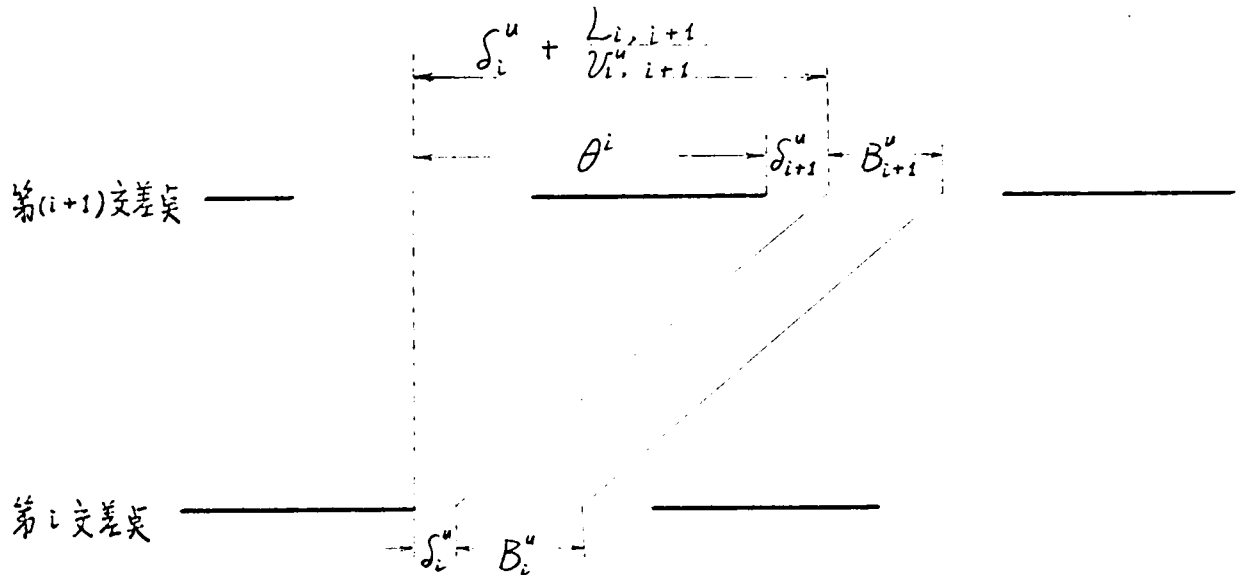


図-3.2.6

つぎに, $\varepsilon_{i+1}^u < 0$ の場合であるが, まず, $-R_{i+1} \leq \varepsilon_{i+1}^u < 0$ の場合は, 条件が (a) の (ii) と同一となり, したがって計算方法も同じものになる。

最後に, $-\theta^i \leq \varepsilon_{i+1}^u < -R_{i+1}$ の場合は信号の周期性を利用

して, この ε_{i+1}^u に C を加えたものを新たに ε_{i+1}^u とする。そうすると

$$C - \theta^i \leq \varepsilon_{i+1}^u < G_{i+1}$$

となるので, この範囲に対応する 1) の (i) の方法がそのまま使えることになる。

[B_{i+1}^d の計算]

B_{i+1}^u の計算とまったく同様にして, 1) の方法を条件により適宜使い分けなければならない。

このようにして, 第 i 交差点と第 $(i+1)$ 交差点の間のあらゆる関係に対して, スループバンドの大きさおよびそれに関連した変数を計算できることがわかった。すなわち, 第 i 交差点において $\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \delta_i^d, e_i^d, B_i^d$ が一組与えられると, θ^{i+1} の値に応じて, 第 $(i+1)$ 交差点における $\delta_{i+1}^u, e_{i+1}^u, B_{i+1}^u, \delta_{i+1}^d, e_{i+1}^d, B_{i+1}^d$ が一組求められるのである。ここに, 太字の δ, B はスループバンドが 2 つに分断される場合も考慮し, 2 次元のベクトルを表わすものとする。

こうした関係を簡単に示すために, 両者の間につきのようない関数表示を考える。すなわち

$$\delta_{i+1}^v = D_{i+1}^v(\delta_i^v, e_i^v, B_i^v, \theta^i) \quad (3.2.4)$$

$$e_{i+1}^v = E_{i+1}^v(\delta_i^v, e_i^v, B_i^v, \theta^i) \quad (3.2.5)$$

$$B_{i+1}^v = F_{i+1}^v(\delta_i^v, e_i^v, B_i^v, \theta^i) \quad (3.2.6)$$

v : u または d .

のように表わされる。

さて以上のような準備のもとに、スルーバンドの最大化に着手するが、ここでは二方通行を対象としているので、上下二方向のスルーバンドの和を最大にしなければならない。しかしながら、一般に、交通需要は方向別に異なるわけであり、加えて政策的に優先方向に、より大きなスルーバンドを与える必要が生ずる可能性もあることから、単に両方向のスルーバンドの和を最大にするよりも、方向ごとにウェイトをつけたスルーバンドの和を対象とする方が、問題を一般化ならしめると考えられる。

したがって、すずつぎのような関数を定義する。

$f_i(\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \delta_i^d, e_i^d, B_i^d)$; 第 i 交差点における

各変数の値が () 中に記した値であるときの、
第 i 交差点から第 N 交差点までの間における上
下両方向のウェイトづけされたスルーバンドの
最大値

最適化は、まず第 $(N-1)$ 交差点と第 N 交差点の間のスルーバンドから始める。すなわち、上の関数を用いると、

$$f_{N-1}(\delta_{N-1}^u, e_{N-1}^u, B_{N-1}^u, \delta_{N-1}^d, e_{N-1}^d, B_{N-1}^d) = \max_{\theta^{N-1}} [w^u B_N^u + w^d B_N^d]$$

ここに、 w^u, w^d はそれぞれおよび d 方向のスルーバンドに対するウェイト w^u, w^d を要素とする 2 次元ベクトルである。

上式は、式 (3.2.4) ~ 式 (3.2.6) を用いると

$$\begin{aligned} f_{N-1}(\delta_{N-1}^u, e_{N-1}^u, B_{N-1}^u, \delta_{N-1}^d, e_{N-1}^d, B_{N-1}^d) \\ = \max_{\theta^{N-1}} [w^u F_N^u(\delta_{N-1}^u, e_{N-1}^u, B_{N-1}^u, \theta^{N-1}) + w^d F_N^d(\delta_{N-1}^d, \end{aligned}$$

$$e_{N-1}^d, B_{N-1}^d, \theta^{N-1})] \quad (3.2.7)$$

となる。ここに、 e が 1 か 2 の値にしたがって、

$$\delta_{N-1}^u + B_{N-1}^u \leq G_{N-1} \quad (e_{N-1}^u = 1 \text{ のとき}) \quad (3.2.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{N-1}^{u1} + B_{N-1}^{u1} &= G_{N-1} \\ B_{N-1}^{u1} + B_{N-1}^{u2} + R_{N-1} &\leq G_{N-2} \end{aligned} \right\} (e_{N-1}^u = 2 \text{ のとき}) \quad (3.2.9)$$

なる関係があることを考慮するものとする。 d 方向についてもまったく同様である。

式(3.2.7)より、 $\delta_{N-1}^u, e_{N-1}^u, B_{N-1}^u, \delta_{N-1}^d, e_{N-1}^d, B_{N-1}^d$ のあらゆる組み合わせに対して、 $f_{N-1}()$ およびそれに対応する θ^{N-1} が求められる。この θ^{N-1} を $\dot{\theta}^{N-1}$ と表わすことにするが、詳細には $\dot{\theta}^{N-1}(\delta_{N-1}^u, e_{N-1}^u, B_{N-1}^u, \delta_{N-1}^d, e_{N-1}^d, B_{N-1}^d)$ と書くこともできよう。

つぎに、第 $(N-2)$ 交差点と第 $(N-1)$ 交差点間の最適化を行なうが、このためには上で求めた $f_{N-1}()$ を利用すればよい。すなわち、式(3.2.4)～式(3.2.6)より

$$\delta_{N-1}^v = D_{N-1}^v(\delta_{N-2}^v, e_{N-2}^v, B_{N-2}^v, \theta^{N-2})$$

$$e_{N-1}^v = E_{N-1}^v(\delta_{N-2}^v, e_{N-2}^v, B_{N-2}^v, \theta^{N-2})$$

$$B_{N-1}^v = F_{N-1}^v(\delta_{N-2}^v, e_{N-2}^v, B_{N-2}^v, \theta^{N-2})$$

ここに、 v : u または d

上の関係を考慮すると

$$f_{N-2}(\delta_{N-2}^u, e_{N-2}^u, B_{N-2}^u, \delta_{N-2}^d, e_{N-2}^d, B_{N-2}^d) = \max_{\theta^{N-2}} [f_{N-1}(D_{N-1}^u(\delta_{N-2}^u,$$

$$e_{N-2}^u, B_{N-2}^u, \theta^{N-2}), E_{N-1}^u(\delta_{N-2}^u, e_{N-2}^u, B_{N-2}^u, \theta^{N-2}), F_{N-1}^u(\delta_{N-2}^u, e_{N-2}^u, B_{N-2}^u, \theta^{N-2}), D_{N-1}^d(\delta_{N-2}^d, e_{N-2}^d, B_{N-2}^d, \theta^{N-2}), E_{N-1}^d(\delta_{N-2}^d, e_{N-2}^d, B_{N-2}^d, \theta^{N-2}), F^d(\delta_{N-2}^d, e_{N-2}^d, B_{N-2}^d, \theta^{N-2}))]$$

となる。この式より $f_{N-2}(\cdot)$ とそれに対応する θ^{N-2} がすべて求められる。ただし、式(3.2.8)および式(3.2.9)に相当する条件を考慮することは言うまでもない。

一般に、第 i 交差点と第 $(i+1)$ 交差点間の最適化の過程はつぎのような繰り返しとの関係に従う。

$$f_i(\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \delta_i^d, e_i^d, B_i^d) = \max_{\theta^i} [f_{i+1}(D_{i+1}^u(\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \theta^i), E_{i+1}^u(\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \theta^i), F_{i+1}^u(\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \theta^i), D_{i+1}^d(\delta_i^d, e_i^d, B_i^d, \theta^i), E_{i+1}^d(\delta_i^d, e_i^d, B_i^d, \theta^i), F^d(\delta_i^d, e_i^d, B_i^d, \theta^i))] \\ (i=1, 2, \dots, N-2)$$

上式より、 $\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, \delta_i^d, e_i^d, B_i^d$ のあらゆる組み合わせに対する $f_i(\cdot)$ および θ^i が求められるのである。

このような操作を順次進めてゆくと、最後に $f_1(\delta_1^u, e_1^u, B_1^u, \delta_1^d, e_1^d, B_1^d)$ が求められるが、これは定義に従えば、第1交差点における $\delta_1^u, e_1^u, B_1^u, \delta_1^d, e_1^d, B_1^d$ が一組与えられた場合の第1交差点から第 N 交差点までのウェイトづけされたスループントの和の最大値である。したがって、この $f_1(\cdot)$ の中での最大値を求めれば、それがここで求めようとしてい

る図-3.2.1 に示したような路線に対するウェイトづけされたスループバンドの最大値ということになる。すなわち

$$\max_{\delta_1^u, e_1^u, B_1^u, \delta_1^d, e_1^d, B_1^d} [f_1(\delta_1^u, e_1^u, B_1^u, \delta_1^d, e_1^d, B_1^d)]$$

である。いまこの $f_1(\cdot)$ を $f_1^*(\cdot)$ と表わすことにし、それに対応する各変数を $\delta_1^u, e_1^u, B_1^u, \delta_1^d, e_1^d, B_1^d, \theta^1$ とする。そうすると、 θ^1 は最大スループバンドに対する第1交差点と第2交差点の間の最適相対オフセットということになる。

つぎに、第2交差点と第3交差点の間の最適相対オフセットは

$$\delta_2^v = D_2^v(\delta_1^v, e_1^v, B_1^v, \theta^1)$$

$$e_2^v = E_2^v(\delta_1^v, e_1^v, B_1^v, \theta^1)$$

$$B_2^v = F_2^v(\delta_1^v, e_1^v, B_1^v, \theta^1)$$

v ; u または d

としたとき、 $f_2(\delta_2^u, e_2^u, B_2^u, \delta_2^d, e_2^d, B_2^d)$ に対応する θ^2 を見つけ出すことによって決定される。この θ^2 を θ^2 と表わす。

以下同様にして、先とは逆に第 N 交差点の方に向って調べてゆくことにより、すべての区間に対応する最適相対オフセット θ^i ($i = 1, 2, \dots, N$) が決定される。

このようにして、数学的手法として DP を用いることにより、各交差点における周期およびスプリットが与えられたという条件のもとで任意の路線の、スループバンド最大に対応するオフセットパターンの設定が可能であることがわかった。

本方法の特徴としては、従来の方法に比べて、各街路区間

の走行速度 $v_{i,i+1}^u, v_{i,i+1}^d$ ($i = 1, 2, \dots, N-1$) がそれぞれ個々の値をもつことを前提としており, より一般化を指向していることが挙げられるが, 計算量が多くなるという欠陥があることは否定できない。

また, 同様の方法により, これらの走行速度自身を決定変数として取り扱うこともできる。すなわち, 式(3.2.4)～式(3.2.6)に代わる関係式として

$$\delta_{i+1}^v = D_{i+1}^v(\delta_i^v, e_i^v, B_i^v, \theta^i, v_{i,i+1}^v)$$

$$e_{i+1}^v = E_{i+1}^v(\delta_i^v, e_i^v, B_i^v, \theta^i, v_{i,i+1}^v)$$

$$B_{i+1}^v = F_{i+1}^v(\delta_i^v, e_i^v, B_i^v, \theta^i, v_{i,i+1}^v)$$

v ; あるいは d

を考え, さらに $f_i(\cdot)$ としては $f_i(\delta_i^u, e_i^u, B_i^u, v_{i,i+1}^u, \delta_i^d, e_i^d, B_i^d, v_{i,i+1}^d)$ を定義すればよいわけである。ただし, この場合実用的観点から

$$U_{i,i+1}^v \leq v_{i,i+1}^v \leq V_{i,i+1}^v$$

ここに, $U_{i,i+1}^v$; 該当区間, 該当方向の最低速度

$V_{i,i+1}^v$; 同じく最高速度

v ; あるいは d

なる制約条件を設ける必要がある。

信号周期 C については, 前節でも述べたように, 一般には対象路線内の最も交通需要が多い交差点に対する周期にあわせて, すべての交差点の周期が与えられてしまうのであるが, いま, スループバンドの観点のみから最適周期を決定するもの

とすれば、上に述べたような最適化の計算を適当に設けたこの変域にわたり逐一実行し、その中で最も大きいスループットを与えることをもって最適周期とすればよい。

3.3 交通損失最小化の手法

つぎに、対象路線内で発生する待ち時間をはじめとする交通損失の総和を最小にするオフセットパターンを設定し、これによって交通の流れを円滑化ならしめるという制御方式について考える。この方法は、前節で述べたスループット方式に比べ、交通需要あるいは待ち行列の形成等の要素を採り入れることになるので、実際的かつ本質的であると考えられる。また、スループット方式がむしろ交通需要の少ない場合に適しているのに対し、本方法は交通需要が比較的多い場合に効果を発揮する。

さて、この制御方式を実際に適用する場合、ソフトウェア上で最も大きな問題となるのは、やはりオフセットパターンの決定方法であろう。以下では、その方法について、2つの場合に分けて検討することにする。

3.3.1 街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合

まず、前章でも検討したが、ある街路区間に発生する交通損失がその両端交差点のオフセットのみに関係して決まる場合で、交通量がかなり多い場合に成り立つ前提である。

いま、図-3.3.1に示したような $(N+2)$ 個の交差点を有する路線に対して、総交通損失最小のオフセットパターン決定を行なうことにする。

まず、対象路線を図のように $(N+1)$ 個の区間に分割し、そのおのおのの区間に $0, 1, 2, \dots, N$ の番号を付す。そ

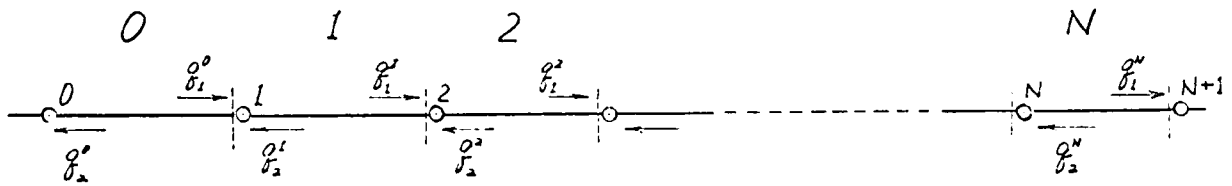


図-3.3.1 損失最小化を図る対象路線

して以下のような記号を導入する。

g_1^n ; 第 n 区間のリンク上を第 n 区間内交差点から第 $(n+1)$ 区間内交差点へ向かう交通量

g_2^n ; g_1^n の対向交通量

θ^n ; 第 n 区間リンクに対応する相対オフセット。すなわち、いま第 n 番目交差点のオフセット政策を ξ^n としたとき $\theta^n = \xi^{n+1} - \xi^n$ である。

さて、仮定よりある街路方向で発生する交通損失を表わす関数を

$g_1^n(\theta^n, g_1^n)$; 第 n 区間の相対オフセットが θ^n であるときに g_1^n が被むる損失

$g_2^n(\theta^n, g_2^n)$; 同様に、 g_2^n が被むる損失

のように定義することが出来る。そうすると、路線全体で発生する損失は

$$F = \sum_{n=0}^N \{ g_1^n(\theta^n, g_1^n) + g_2^n(\theta^n, g_2^n) \}$$

のように表わされるので、これを最小にする各区間の相対オフセットを求めることが目的となる。しかしながら、この目的関数 F の最小化は非常に単純である。なぜならば、各区間で発生する損失がその区間の相対オフセットのみに従属して決まるので、おのおのの区間ごとに個別に最小化を行えばよいからである。すなわち、いま第 n 区間の最適相対オフセ

ットを θ^n で表わすものとするれば, それは $\min_{\theta^n} [g_1^n(\theta^n, g_1^n) + g_2^n(\theta^n, g_2^n)]$ を満たす θ^n として求められてしまうのである。従来から用いられている路線系統制御オフセットはこのような方法によって設定されていることが多い。

このように, 交通量が多く交通損失が定義に示したような関係にある場合には, 原理的に最適オフセットパターンの設定は極めて容易であるから, 要は交通損失の関数形をいかに現実在即した形で与えてやるかに懸っているといえよう。そのためには対象とする街路区間およびその両端の交差点において, 容量調査をはじめとする交通および道路条件の異なる実験調査が必要であると考えられる。

3.3.2 隣接区間の相対オフセットの影響を考慮した場合

つぎに, 3.3.1 の場合に比べて交通量が若干少なく, 隣接区間の相対オフセットの影響が, 当該区間で発生する交通損失に及んでくる場合における最適オフセットパターンの探索法について考えてみる。

対象路線および記号の定義は 3.3.1 と同じものとするが, 交通損失関数は仮定より

$g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_1^n)$; 第 $(n-1)$ 区間の相対オフセットが θ^{n-1} ,
第 n 区間の相対オフセットが θ^n であるとき, g_1^n が被むる損失

$g_2^n(\theta^n, \theta^{n+1}, g_2^n)$; 同様にして g_2^n が被むる損失

ただし, $g_1^0(\theta^{-1}, \theta^0, g_1^0) = g_1^0(\theta^0, g_1^0)$

$g_2^N(\theta^N, \theta^{N+1}, g_2^N) = g_2^N(\theta^N, g_2^N)$

と表わされる。そうすると最小にすべき路線全体の総損失は次式のようになる。

$$F = \sum_{n=0}^N \{ g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_1^n) + g_2^n(\theta^n, \theta^{n+1}, g_2^n) \} \quad (3.3.1)$$

式(3.3.1)で与えられる目的関数 J を最小にするような θ^n ($n=0, 1, 2, \dots, N$)を求めれば, そのほとんど自動的にここで求めようとする最適オフセット政策を得ることになるであろう。

目的関数 J を最小化ならしめる数学的手法にはいくつかの方法が考えられるが, ここではポントリヤーギンの最大原理にその源を発するファン・ワン(L. T. Fan & C. S. Wang.)の離散型最大原理による方法とDPによる方法の2つの方法について考えてみる。

(1) 離散型最大原理による方法

ファン・ワンの離散型最大原理⁵⁰⁾は1962年ケイツ(S. Katz)が発表した離散型最大原理⁵¹⁾を一般化した手法であって, 時間あるいは空間に対して不連続なプロセスおよびいわゆる多段決定過程とみられるプロセスとみられるプロセスの最適値問題を取り扱うのに有利な手法である。以下において, 若干この離散型最大原理について説明を加えておこう。⁵²⁾

まず, 多段決定過程とは時間的あるいは空間的な意味において有限個の段階から成り立っている過程をいい, 各段階において決定あるいは操作を行なうことによって過程の状態を段階ごとに順次変換してゆくもので, それによって多種多様の活動を表わすことができる抽象的な概念である。このとき各段階で変換される変数を状態変数, 変換を行なう決定変数を操作変数とよび, また状態変数の変換を記述する式を状態方程式という。多段決定過程の代表的な例として図-3.3.2のような連結型段階を考えると, 各段階における状態変数あるいは状態ベクトルを各段階に入ってくる流れおよび出てゆく流れと概念的に考えられる。最大または最小にすべき評価

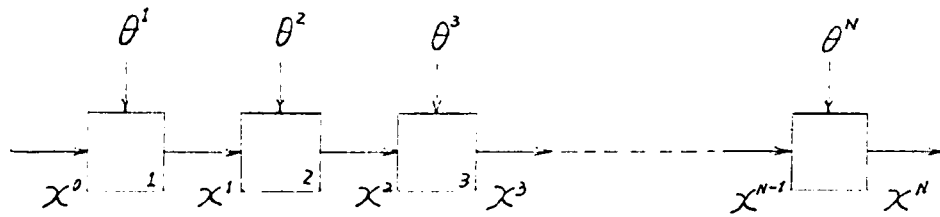


図-3.3.2 多段プロセスの代表例

関数は一般にこの過程の最後の段階を出てゆく状態変数の関数として表現される。

このようにして一般的な多段決定過程の最適化問題はつぎのように述べられる。すなわち、ある過程を完全に記述している状態方程式と状態変数の初期条件およびいくつかの状態変数の終端値などを与えて、ある制約条件に従う各段階の決定変数を評価関数が最大または最小になるように決定することである。

図-3.3.2のような過程の解法について基本的な考え方を示すとつぎのようになる。

まず、第 n 段階における状態方程式はつぎのように与えられる。

$$x^n = T^n(x^{n-1}, \theta^n)$$

ここに、 x^n ; S 個の要素から成る第 n 段階の状態ベクトル

θ^n ; 第 n 段階の決定ベクトル

このとき、次式によって定義されるハミルトニアンを最大または最小にする θ^n を見い出せば、それが求める最適決定ベクトルとなる。

$$H^n = \sum_{i=1}^S Z_i^n T_i^n(x^{n-1}, \theta^n) \quad (n=1, 2, \dots, N)$$

この式に含まれる Z_i^n は補助変数とよばれるもので

$$Z_i^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial x_i^{n-1}}$$

なる関係がある。ただし、 Z_i^n の終端条件はいま評価関数（目的関数）を $F(x^N)$ で表わすものとするれば

$$Z_i^N = \frac{\partial F(x^N)}{\partial x_i^N} \quad (i=1, 2, \dots, S)$$

である。

さて、このファン・ワンの離散型最大原理を導入するにあたり、まず路線の区間分割を多段決定過程の段階分けに対応させる⁵³⁾ すなわち、 $g(\theta, \theta', g)$ なる状態変数と θ なる操作変数から構成される $(N+1)$ 段階のプロセスを経ることによって、路線の全区間で発生する総損失の最小化を図ろうというわけである。

しかしながら、ここで示した問題そのままの形では離散型最大原理の適用が不可能である。そこで、状態変数および操作変数を付加修正することによって、標準的な問題に変換する必要がある。

・ そのために、まず式(3.3.1)の目的関数 F を

$$\begin{aligned} F &= \sum_{n=0}^N \left\{ g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_1^n) + g_2^n(\theta^n, \theta^{n+1}, g_2^n) \right\} \\ &= \sum_{n=0}^{N+1} \left\{ g_2^{n-1}(\theta^{n-1}, \theta^n, g_2^{n-1}) + g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_1^n) \right\} \quad (3.3.2) \end{aligned}$$

$$\text{ただし、} g_2^{-1}(\theta^{-1}, \theta^0, g_2^{-1}) = g_1^{N+1}(\theta^N, \theta^{N+1}, g_1^{N+1}) = 0$$

のように書き換える。そして、第 n 段階の状態変数としてつぎのような量を導入する。

$$x_1^n = x_1^{n-1} + \left\{ g_2^{n-1}(\theta^{n-1}, \theta^n, g_2^{n-1}) + g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_2^n) \right\} \quad (3.3.3)$$

$$(n = 1, 2, \dots, N)$$

ただし,

$$x_1^0 = g_1^0(\theta^0, g_1^0) \quad (3.3.4)$$

$$x_1^N = x_1^{N-1} + \left\{ g_2^{N-1}(\theta^{N-1}, \theta^N, g_2^{N-1}) + g_1^N(\theta^{N-1}, \theta^N, g_2^N) + g_2^N(\theta^N, g_2^N) \right\} \quad (3.3.5)$$

とする。

この x_1^n は式(3.3.3)の形をみればわかるとおり、第 $(n-1)$ 区間までの損失累計に第 n 区間の g_1^n が被る損失 $g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_1^n)$ を加えたものである。したがって、目的関数 F はこの状態変数で表わすと x_1^N となることがわかる。

さらに,

$$x_2^n = \theta^n \quad (3.3.6)$$

$$\varphi^n = \theta^n - \theta^{n-1} \quad (3.3.7)$$

とおくと、式(3.3.3)で与えられる状態変数 x_1^n は

$$x_1^n = x_1^{n-1} + \left\{ g_2^{n-1}(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_2^{n-1}) + g_1^n(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_1^n) \right\} \quad (3.3.8)$$

となる。上式に含まれる x_2^{n-1} を第2番目の状態変数と考え、 φ^n を操作変数と考えるのである。この場合、状態変数 x_2^n に関する状態方程式は式(3.3.6)および式(3.3.7)を考えると

$$x_2^n = x_2^{n-1} + \varphi^n \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (3.3.9)$$

のように与えられる。

このようにすると，ここで取り扱う問題は式(3.3.8)および式(3.3.9)の状態方程式のもとに， x_1^n を最小にするような各段階における操作変数 φ^n を決定するという問題に変換された。これが先にも述べたが，離散型最大原理で与えられている標準的な問題で，具体的な解法は以下のようなになる。

まず，第 n 区間におけるハミルトニアンはつぎのようになる。

$$H^n = Z_1^n x_1^n + Z_2^n x_2^n \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (3.3.10)$$

ここに， Z_1^n ， Z_2^n は補助変数であり，以下の関係式を満足する。

$$Z_1^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial x_1^{n-1}} \quad (3.3.11)$$

$$Z_2^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial x_2^{n-1}} \quad (3.3.12)$$

$$(n=1, 2, \dots, N)$$

ただし，式(3.3.11)，式(3.3.12)の偏微分は，それが意味をもつ場合においてのみ有効で，そうでない場合には差分を意味するものとする。

式(3.3.8)および式(3.3.9)の関数を式(3.3.10)で与えられるハミルトニアンに代入すると

$$H^n = Z_1^n [x_1^{n-1} + \{g_2^{n-1}(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_2^{n-1}) + g_1^n(x_2^{n-1}, \varphi^n$$

$$+ \chi_2^{n-1}, g_1^n) \}} + Z_2^n (\varphi^n + \chi_2^{n-1}) \quad (3.3.13)$$

となる。したがって、式(3.3.11)および式(3.3.12)に式(3.3.13)の関係を考慮すると

$$Z_1^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial \chi_1^{n-1}} = Z_1^n \quad (3.3.14)$$

$$\begin{aligned} Z_2^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial \chi_2^{n-1}} = & Z_2^n + Z_1^n \left[\left\{ g_2^{n-1}(\chi_2^{n-1} + 1, \varphi^n + \chi_2^{n-1} + 1, g_2^{n-1}) \right. \right. \\ & - g_2^{n-1}(\chi_2^{n-1}, \varphi^n + \chi_2^{n-1}, g_2^{n-1}) \left. \right\} + \left\{ g_1^n(\chi_2^{n-1} + 1, \varphi^n + \right. \\ & \left. \chi_2^{n-1} + 1, g_1^n) - g_1^n(\chi_2^{n-1}, \varphi^n + \chi_2^{n-1}, g_1^n) \right\} \left. \right] \quad (3.3.15) \end{aligned}$$

となる。ただし、上式では簡単のために差分法を適用している。

ところで、前述のように目的関数 F は

$$F = 1 \cdot \chi_1^N + 0 \cdot \chi_2^N$$

で与えられるので、 Z_1^N , Z_2^N の終端条件はつぎのようになる。

$$Z_1^N = 1 \quad (3.3.16)$$

$$Z_2^N = 0 \quad (3.3.17)$$

式(3.3.14), 式(3.3.15)に式(3.3.16)を考慮すると

$$Z_1^{n-1} = 1 \quad (3.3.18)$$

$$\begin{aligned} Z_2^{n-1} = & Z_2^n + \left[\left\{ g_2^{n-1}(\chi_2^{n-1} + 1, \varphi^n + \chi_2^{n-1} + 1, g_2^{n-1}) \right. \right. \\ & - g_2^{n-1}(\chi_2^{n-1}, \varphi^n + \chi_2^{n-1}, g_2^{n-1}) \left. \right\} + \left\{ g_1^n(\chi_2^{n-1} + 1, \varphi^n + \chi_2^{n-1} + 1, g_1^n) \right. \\ & \left. \left. - g_1^n(\chi_2^{n-1}, \varphi^n + \chi_2^{n-1}, g_1^n) \right\} \right] \end{aligned}$$

$$- g_1^n(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_1^n) \} \} \quad (3.3.19)$$

$$(n = 2, 3, \dots, N)$$

式(3.3.18)から, 式(3.3.13)で与えられるハミルトニアンはけっきょくつぎのようになる。

$$\begin{aligned} H^n = & x_1^{n-1} + \{ g_2^{n-1}(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_2^{n-1}) \\ & + g_1^n(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_1^n) \} + Z_2^n(\varphi^n + x_2^{n-1}) \end{aligned} \quad (3.3.20)$$

このようにすると, 各段階における最適操作変数 φ^n はその変域で式(3.2.20)によって与えられる H^n を最小ならしめる値をみつけたることによって決定される。

ところで, φ^n の変域を調べてみると, 式(3.3.9)の状態方程式で $-C \leq x_2^n \leq C$ なる関係があるので, $-C \leq \varphi^n + x_2^{n-1} \leq C$ すなわち $-C - x_2^{n-1} \leq \varphi^n \leq C - x_2^{n-1}$ のようになる。したがって, いま求める最適操作変数を φ^n とすると, それは

$$\begin{aligned} \min H^n = & \min_{-C - x_2^{n-1} \leq \varphi^n \leq C - x_2^{n-1}} [x_1^{n-1} + \{ g_2^{n-1}(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_2^{n-1}) \\ & + g_1^n(x_2^{n-1}, \varphi^n + x_2^{n-1}, g_1^n) \} + Z_2^n(\varphi^n + x_2^{n-1})] \end{aligned} \quad (3.3.21)$$

を満足する φ^n をみつけたせばよいことになる。

以上に述べたような過程を経ることによって, 原理的には一路線で発生する交通の総損失最小の規準からみた各交差点の最適オフセットが決定されることがわかった。

しかしながら, 上では最適オフセットパターン決定手法の骨子となる考え方を示したにすぎない。したがって, 以下に

おいて最適オフセットパターンを求めてゆく際の詳細な計算手順について述べることにする。

[計算手順]

ここで取り扱った最適オフセットパターン決定の問題は、離散型最大原理による数学的問題としてみた場合、状態変数の境界条件、すなわち始端点 x_1^0, x_2^0 および終端点 x_1^N, x_2^N がともに自由端となっているので、このままの形では従来の方法では解くことができない。したがって、ここでは始端点を固定端とし、 x_1^0, x_2^0 の全領域について逐一最適解を求めるという方法をとることを考える。

ステップー1. x_2^0 を仮定し、式(3.3.4)より x_1^0 を計算する。

ステップー2. 各段階の操作変数 φ^n ($n=1, 2, \dots, N$) を仮定する。

ステップー3. 仮定した φ^n と x_1^0, x_2^0 より、式(3.3.8)および式(3.3.9)の状態方程式を利用して x_1^n, x_2^n を $n=1, 2, \dots, N$ の順に計算する。

ステップー4. 仮定した φ^n とステップー3で求められた x_2^n を用い、式(3.3.19)より z_2^n を $n=N-1, N-2, \dots, 1$ の順に求める。

ステップー5. ステップー3で求めた x_1^n, x_2^n とステップー4で求めた z_2^n を用い、式(3.3.20)で与えられるハミルトニアン H^n を最小にする操作変数 $\dot{\varphi}^n$ ($n=1, 2, \dots, N$) を計算する。

ステップー6. ステップー5で求めた $\dot{\varphi}^n$ がステップー2で仮定した φ^n に等しければステップー7に、そうでない場合にはこの $\dot{\varphi}^n$ を新たな φ^n の

仮定値としてステップ-2にもどる。

ステップ-7. 求められた x_1^N およびそのときのすべての x_2^n ($n=0, 1, 2, \dots, N$) を記憶した後, 新たな x_2^0 を仮定し, x_1^0 を計算してステップ-2にもどる。

ステップ-8. すべての x_2^0 (したがって x_1^0) について計算を完了したならば, 各始端点条件に対する x_1^N を比較し, その中で最小のものを見出し, それに対応する x_2^n ($n=0, 1, 2, \dots, N$) をとり出せば, それがここで求める各交差点間の最適相対オフセット政策となる。

(2) DP による方法

同じ問題をDPを用いて解く方法について考える。そのためにまず次のような関数を定義する。

$f_n(\theta^{n-1})$; 第 $(n-1)$ 区間における相対オフセットが θ^{n-1} であるという条件のもとに第 n 区間から第 N 区間に対応する相対オフセットを最適したときに, それら $(N-n+1)$ 個の区間で発生する交通損失

そうすると, まず $f_N(\theta^{N-1})$ については定義より

$$f_N(\theta^{N-1}) = \min_{\theta^N} [g_1^N(\theta^{N-1}, \theta^N, g_1^N) + g_2^N(\theta^N, g_2^N)]$$

となる。上式により, θ^{N-1} のあらゆる値 (適当に離散的にとるものとする) に対する $f_N(\theta^{N-1})$ とそれに対応する θ^N が求められる。いま, この θ^N を $\hat{\theta}^N$ と表わすことにする。詳しくは, $\hat{\theta}^N(\theta^{N-1})$ と書くこともできよう。このようにして第

N 区間の最適化が完了する。

つぎに、第 $(N-1)$ 区間の最適化であるが、このためには上で求めた $f_N(\theta^{N-1})$ を利用する。

$$f_{N-1}(\theta^{N-2}) = \min_{\theta^{N-1}} [\{g_1^{N-1}(\theta^{N-2}, \theta^{N-1}, g_1^{N-1}) + g_2^{N-1}(\theta^{N-2}, \theta^{N-1}, g_2^{N-1})\} + f_N(\theta^{N-1})]$$

上式より、 θ^{N-2} の値に応じて $f_{N-1}(\theta^{N-2})$ および θ^{N-1} が計算される。

一般に、第 n 区間に対する最適化の過程はつぎのような最適性の原理に従かう繰り返えしの関係による。

$$f_n(\theta^{n-1}) = \min_{\theta^n} [\{g_1^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_1^n) + g_2^n(\theta^{n-1}, \theta^n, g_2^n)\} + f_{n+1}(\theta^n)] \quad (3.3.22)$$

($n=1, 2, \dots, N$)

式(3.3.22)の関係式を用いることにより、 $f_{N-1}, f_{N-2}, \dots, f_1$ が一つづつに求められてゆくが、最後の f_0 の計算については、それをもはや条件付で行なう必要がない。なぜならば第0区間より左側の区間は存在しないからである。したがって

$$f_0 = \min_{\theta^0} [\{g_1^0(\theta^0, g_1^0) + g_2^0(\theta^0, \theta^0, g_2^0)\} + f_1(\theta^0)]$$

のように表わすことができるが、この段階で求められた θ^0 はそれが条件付きでないことから、第0区間に対する絶対最適相対オフセットである。これをいま θ^* と表わす。そうすると第1区間に対応する最適相対オフセット θ^1 は、先に計算してあった $f_1(\theta^0)$ の中で $f_1(\theta^*)$ を見出し、それに対応

する θ^1 をとり出すことによって決定される。第2区間の最適相対オフセット θ^2 についても同様に、 $f_2(\theta^1)$ に対応する θ^2 を見つけ出すことによって決定されるというように、先とは逆に第 N 区間に向って調らべてゆけば、対象路線のすべての区間における相対オフセットの最適値 θ^n ($n=0, 1, 2, \dots, N$) が求められるのである。

このようにして、ある区間で発生する交通損失が隣接区間の相対オフセットにも影響を受ける場合のオフセットパターンの設定は、離散型最大原理によっても、また DP によっても可能であることがわかったが、どちらの方法を採用するかについては、損失関数の形との関連において、使用される電子計算機の容量を考慮しつつ最も効率のよいものを選ぶことにすればよいであろう。いずれにしても、計算過程自体はそれほど複雑ではないので、問題は 3.3.1 の場合と同様に、損失関数をいかにして与えるかである。前章のようにシミュレーションによる方法も考えられるが、この場合は独立変数が2つあるので困難は避けられない。別に車群波形を矩形波あるいは三角波などと仮定して、2区間の相対オフセットに応じて交通損失を計算するという方法も考えられるが、これも実験、観測によって十分な裏づけがない限り、不用意に用いることはできない。

前章における検討の範囲においては、かなりの幅をもった交通量に対して、街路区間相互の交通損失の独立性が成立するわけであるから、実際問題としては 3.3.2 の方式を用いる必要性はあまりないと考えてよいであろう。したがって、待ち時間にしろ、走行所要時間にしろ、交通損失最小の規準による路線系統制御のためのオフセットパターンの決定は、3.3.1

に示したような極めて簡単な方法によって行なえるわけである。

3.4 車群の再編成をねらったオフセット設定法

上では、スループバンドにしても交通損失にしても、制御の評価規準を明確にして、それを最大あるいは最小にすることによってオフセットパターンの設定を行なったが、ここでは上流側の交差点を流出してきた車群が、下流側交差点の待ち行列の後端が動き始めて、ある一定速度に達したときに、ちょうど追いつくという単純な条件のみでオフセット設定を行なう方法について検討してみよう。これは 3.2 または 3.3 の方法に比べて、待ち行列の長さをばっきりと考慮しているわけであるし、また別の観点からすれば車群の再編成をねらった制御であるということもできるのである。

すなわち、いま図-3.4.1(a)で、交差点 a において停止させられていた車のうち、最後尾車(図中 \times で示してある車)に注目したとき、その車がその後交差点 a の信号が青信号となったために走行を開始し、ちょうど v なる速度に達したときに、交差点 b を流出してきた車群の先頭車がその d だけ後方(ここに、 d は v で走行する車の安全車頭間隔とする)に到達するように、 a, b 2 交差点間の相対オフセットを設定しようというわけである(図-3.4.1(b) 参照)。

まず、記号をつぎのように定義する。

L ; 交差点間の距離

b_0 ; 停止時の車の平均車頭間隔

t_c ; 交差点 b から発進した先頭車が、交差点 b を通過するのに要する時間

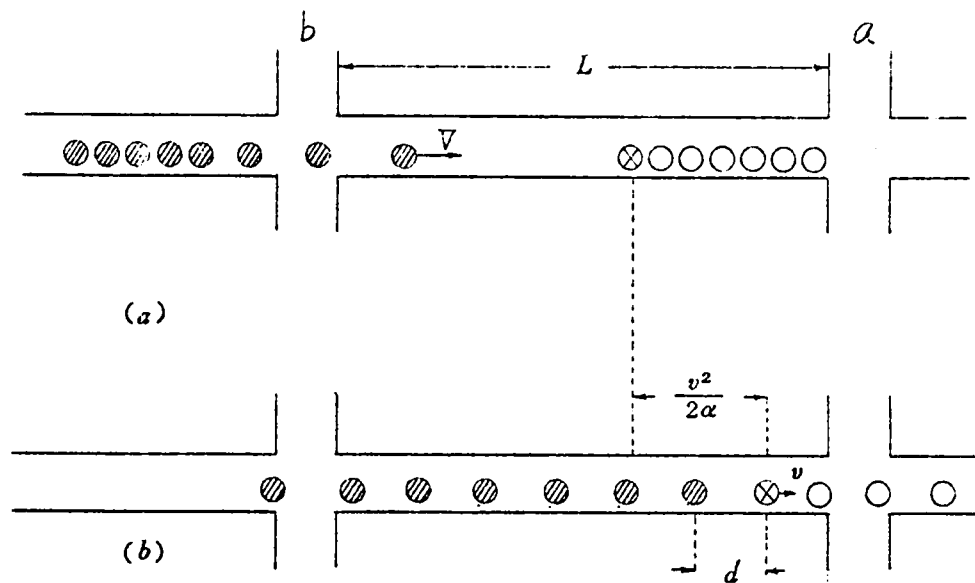


図-3.4.1 車群相互の位置関係

T ; 反応時間

θ ; 交差点 a の絶対オフセットから交差点 b の絶対オフセットを差し引いた値 (相対オフセット)

α ; 車の加速度

V ; 交差点 b を通過した後の車の平均速行速度 (原則として $V > v$ とする)

N ; 交差点 a の赤信号が終る直前の待ち行列構成台数

q ; 交差点 b における交差方向からの分岐交通量 (右折車あるいは左折車)

また, 通行システムは一方通行とする。

さて, まず $\theta > 0$ と仮定したときに, どのようにして θ を決定するかについて検討してみよう。

いま, 交差点 a における待ち行列台数の交差点 b の青信号が始まった直後における値を N' とする。そうすると, その待ち行列の後尾から交差点 b の流出口までの距離は簡単に, $(L - N' b_0)$ として求められるが, この部分には交差点 b の

交差方向から分岐してきた車が走行していると考えられる。したがって、交差点 a で待ち行列に加わる車の総計を求めるためには、 N' にこの部分に存在する車の台数を加え合わせるなければならない。ところで、分岐交通に対する交通密度を k とすると

$$k = \frac{g}{V}$$

ける関係があるから、けっきょく N' に付け加わる台数は $k \cdot (L - N' b_0) = \frac{g}{V} \cdot (L - N' b_0)$ となる。したがって、交差点 a で待ち行列に加わる総台数を N_s とすると

$$N_s = N' + \frac{g}{V} \cdot (L - N' b_0) \quad (3.4.1)$$

一方、交差点 a における赤信号開始直前の待ち行列台数 N と N' の関係は

$$N = N' + \theta \cdot g$$

したがって

$$N' = N - \theta \cdot g \quad (3.4.2)$$

となる。式 (3.4.2) を式 (3.4.1) に代入して

$$N_s = N - \theta g + \frac{g}{V} \{ L - (N - \theta g) b_0 \} \quad (3.4.3)$$

を得る。すなわち、図-3.4.1(a) に示した \otimes 印の車が N_s 台目の車ということになる。

交差点 b を流出してきた車群の先頭車が、図-3.4.1(b) に示したような位置に到達する時間 t_1 は、この N_s を利用すると

$$t_1 = t_c + \frac{L - N_s \cdot b_0 + \frac{v^2}{2\alpha}}{V} \quad (3.4.4)$$

のように表わされる。

一方、交差点 a における待ち行列の最後尾に位置する車が、交差点 a の青信号が開始してから、図-3.4.1 (b) に示したような位置に到達するまでの時間 t_2 は、車の発進に伴う反応時間の遅れ T を考慮すると

$$t_2 = T N_s + \frac{v}{\alpha} \quad (3.4.5)$$

となる。

いま、交差点 a の青信号の開始時刻を基準にとると、上で求めた t_1 と t_2 の関係は、ここで検討しようとしている前提により

$$t_1 - \theta = t_2 \quad (3.4.6)$$

となるはずである。

式(3.4.3)～式(3.4.5)を考慮すると、けっきょく式(3.4.6)はつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} t_c + \frac{L - [N - \theta f + \frac{2}{V} \{L - (N - \theta f) b_0\}] b_0 + \frac{v^2}{2\alpha} - d}{V} - \theta \\ = T \cdot [N - \theta f + \frac{2}{V} \{L - (N - \theta f) b_0\}] + \frac{v}{\alpha} \end{aligned} \quad (3.4.7)$$

上式を解くと、 θ はつぎのように与えられる。

$$\theta = \frac{\frac{L - N b_0}{V} (1 - \frac{2 b_0}{V} - T f) - \{T \cdot N + \frac{v}{2\alpha} (2 - \frac{v}{V}) - t_c + \frac{d}{V}\}}{1 - \frac{2 b_0}{V} - T f + (\frac{2^2 b_0^2}{V^2} + \frac{2 b_0 - T}{V})} \quad (3.4.8)$$

ところで、上式の分母で () の中の部分に注目してみると、

$$\frac{g^2 b_0^2}{V^2} + \frac{g^2 b_0 T}{V} = \left(\frac{g b_0}{V} \right)^2 + \frac{g b_0}{V} \cdot T g$$

となるが、 $\frac{g b_0}{V}$ の意味するものは V なる速度で b_0 を走行する時間における分岐交通量と考えられるし、 $T g$ は同様に反応時間内の交通量と解されるが、これらはいずれも 1 よりかなり小さな値であると思われる。したがって、上式で表わされる部分は近似的に 0 においてさしつかえないであろう。そうすると、式 (3.4.8) は

$$\theta \doteq \frac{L}{V} - \frac{N b_0}{V} - \frac{\{TN + \frac{V}{2\alpha}(2 - \frac{V}{V}) - t_c + \frac{d}{V}\}}{1 - \frac{g b_0}{V} - T g}$$

となる。上式第 3 項に $\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + \dots$ なる関係を用い、微少量の 2 次の項を無視すると、けっきょく

$$\begin{aligned} \theta \doteq & (t_c + \frac{L}{V}) - \frac{N b_0}{V} - \{TN + \frac{V}{2\alpha}(2 - \frac{V}{V}) + \frac{d}{V}\} (1 + \frac{g b_0}{V} \\ & + T g) + t_c (\frac{g b_0}{V} + T g) \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

となる。

上式第 1 項は、待ち行列の長さをまったく無視した場合のオフセットで、スループット最大の制御に対応するものである。式 (3.4.9) は、したがってこのオフセットを第 2 項以降の項で補正していると理解される。

$\theta < 0$ すなわち、交差点 a の青信号が交差点 b の青信号よりも先に始まる場合についても、上と同様の考え方で計算を進めてゆくと、けっきょく式 (3.4.8) と同じ解が得られる。

したがって、式 (3.4.9) で表わされる近似解は θ の正負にかかわらないものである。いま、この式を使って、 $\theta = 0$ すなわち同時オフセットとなるような N の値 (これを N_0 とす

る) を求めてみると,

$$N_0 = \frac{(t_c + \frac{L}{V}) - \left\{ \frac{V}{2\alpha} (2 - \frac{V}{V}) + \frac{d}{V} \right\} (1 + \frac{g b_0}{V} + Tg) + t_c (\frac{g b_0}{V} + Tg)}{\frac{b_0}{V} + T}$$

となる。

いま,

$$b_0 = 6 \text{ m}$$

$$V = 12.5 \text{ m/sec (45 km/時)}$$

$$U = 8.5 \text{ m/sec (35 km/時)}$$

$$T = 1 \text{ sec}$$

$$t_c = 8 \text{ sec}$$

$$g = 0.042 \text{ 台/sec (150 台/時)}$$

$$d = 10 \text{ m}$$

$$\alpha = 1.6 \text{ m/sec}^2$$

として, N_0 およびその時の待ち行列長 L_0 を計算してみると表-3.4.1 のようになる。本表より, たとえば交差点間隔が 400 m の場合には, 下流側交差点における赤信号終了時の待ち行列の台数が 24 台, すなわち行列長が 144 m 以下の場合には, オフセットは交差点 b の青信号が始まってしばらく後に交差点 a の青信号が始まるように設定すればよく,

表-3.4.1 $\theta=0$ に対応する待ち行列

$L \text{ (m)}$	$N_0 \text{ (台)}$	$L_0 \text{ (m)}$	L_0/L
100	8	48	0.48
200	13	78	0.39
300	19	114	0.38
400	24	144	0.36
500	30	180	0.36
600	35	210	0.35

逆に, それ以上の場合には, 交差点 a の青信号が始まり早が何台か流出した後, 交差点 b の青信号を開始させればよいということなどがわかる。

式(3.4.9)における N については $\theta < 0$ の場合ならば、原理的にはこの台数を何らかの機器的な方法によって検知した後、それを用いて θ を設定できるが、 $\theta > 0$ の場合にはそれは不可能であるから、1周期前に検知された値を用いるなどの方法を講ずる必要がある。また、 V あるいは v などの値は交通状態に応じて適宜変えてもよい。 $\frac{V^2}{2\alpha}$ あるいは $\frac{v}{\alpha}$ の値については、この式を用いるよりも実測による距離あるいは時間を用いた方がよいであろう。

この方式によるオフセットづけは、先にも述べたように明確な評価規準はないが、結果的には停止回数最小の制御あるいは待ち時間最小の制御になっている可能性もある。いずれにしても、交差点 b から流出してきた車群の伸長を抑制し、交差点 a で信号待ちをしていた車とともに、一団となって交差点 a を流出するようにしようとする制御であるから、戦略的な一制御方法となり得るものと考えられる。

以上、3.2～3.4で述べた路線系統制御におけるオフセット設定法は、いずれも1つの路線を対象としたものであるが、本研究で問題とする街路網に対しては、図-3.4.2に一例を示したように、街路網から適当に選り出された幾本かの路線に、上に述べてきたような方法を適用してオフセットを設定し、網全体としての制御効果があがるようにすればよい。路線の選定については、交通需要が多く、制御効果が最も現われることが基本

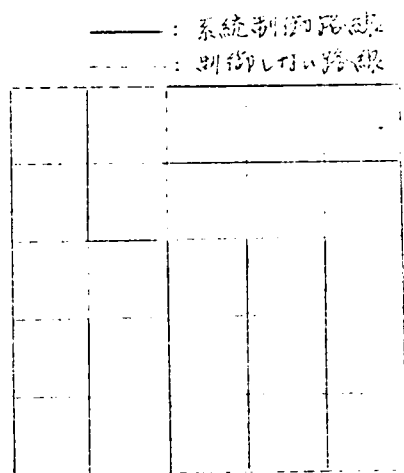


図-3.4.2 路線系統による面制御

的な判断基準となるが、実際には、交通の流れに沿った方向の路線あるいは道路条件が優れていて交通処理能力が高い路線を選ぶなど、別の観点から選定することも考えなければならぬであろう。また、路線系統制御によって、配分交通量自身が変化することを前提とするならば、あらかじめのOD交通量を最短経路に近い形で街路網に配分し、その結果を見ながら、制御効率の最も高いと思われる路線を順次選んでゆくことも必要となろう。

いずれにしても、こうした系統路線選定の問題については、対象街路網の綿密な調査解析があってはじめて、現実的な解決方法が見い出されるものと思われる。

3.5 ツリー形成による制御

前節では、図-3.4.2にも示したように、対象街路網中の何本かの相互に独立した路線に対して系統制御を行なうという方法について検討したが、本節では路線を相互に連結し合ってツリーを形成し、そのツリーに対して系統制御を行なうという制御方式におけるオフセット設定法について考察する(図-3.5.1参照)。

図-3.5.1に示したようなツリーは、1つのツリーで対象街路網のすべての交差点をカバーしていることから、最大ツリーとよばれるが、このような最大ツリーに対して系統制御を行なうのは、対象街路網全体にわたって交通状態がほぼ似かよっていて、同一周期のもとにオフセット

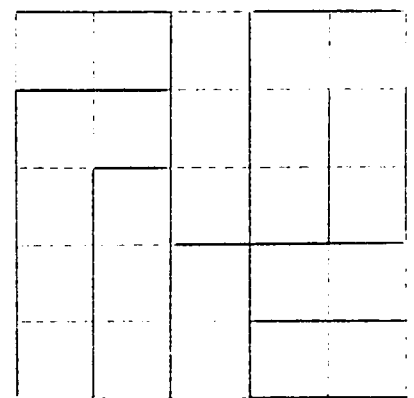


図-3.5.1 街路網におけるツリー

制御を行なった方が好ましいと判断される場合であって、交通状態が街路網のいくつかの部分によって異なる場合には、そのおののの部分において独立したツリー形成を回ればよいことは言うまでもない。

以下では、交通状態は対象街路網全域にわたってそれほど異ならないという前提のもとに、最大ツリーの選が方およびそこにおける交通損失を規準としたオフセットパターンの決定方法について考えてみる。

3.5.1 街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合

いま、簡単のために対象街路網を格子状街路網とし、図-3.5.2に示すように各交差点に番号を付す。そして、以下の

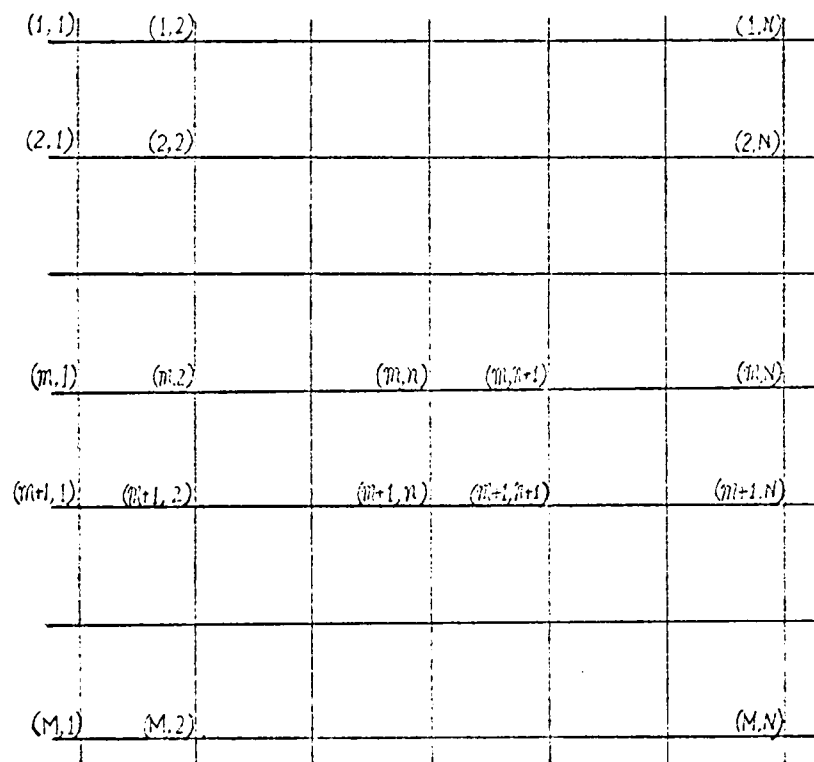


図-3.5.2 対象格子状街路網

ような記号を、次節以降でも共通に用いるべく定義する。

$\theta^{m,n}$; 交差点 (m, n) の水平方向のリンクに対する背位
号開始時刻の基準時からのずれ $\theta^{m,n}$ (すなわち交

差点 (m, n) の絶対オフセット) から, 交差点 $(m, n+1)$ の水平方向のリンクに対する青信号開始時刻の基準時からのずれ $\theta^{m,n+1}$ を差し引いた値, すなわち両交差点間の相対オフセット ($m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N-1$)

$\theta^{m,n}$; 交差点 (m, n) の垂直方向リンクに対する赤信号開始時刻の基準時からのずれ (これは上に説明した $\theta^{m,n}$ に等しい) から, 交差点 $(m+1, n)$ の垂直方向リンクに対する赤信号開始時刻の基準時からのずれを差し引いた値 ($m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N$)

$\theta^{m,n}$ はいわゆるオフセットとは異なるが, 後に述べるように両端交差点のスプリットを考慮すれば, 容易に本来の意味の相対オフセットに変換できるので, 最適オフセットパターンを探す上においては何ら問題はない。

$h_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n}, h_{g_1}^{m,n})$; 交差点 (m, n) から交差点 $(m, n+1)$ に向かう交通 $h_{g_1}^{m,n}$ が, 当該2交差点間の相対オフセットが $\theta^{m,n}$ のときに被る損失

$v_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n}, v_{g_1}^{m,n})$; 交差点 (m, n) から交差点 $(m+1, n)$ に向かう交通 $v_{g_1}^{m,n}$ が, 当該2交差点間の相対オフセットが $\theta^{m,n}$ のときに被る損失

$h_{g_2}^{m,n}(\theta^{m,n}, h_{g_2}^{m,n})$; $h_{g_1}^{m,n}$ の対向交通 $h_{g_2}^{m,n}$ が被る損失

$v_{g_2}^{m,n}(\theta^{m,n}, v_{g_2}^{m,n})$; $v_{g_1}^{m,n}$ の対向交通 $v_{g_2}^{m,n}$ が被る損失

ところで, 上記損失関数のうち $v_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n}, v_{g_1}^{m,n})$ はその独立変数 $\theta^{m,n}$ が前述のように両端交差点の赤信号開始時刻の差にとられており, 本来の意味における相対オフセット (青信号開始時刻の差) との間の関数関係という形では与えられ

ていない。そこで本来の相対オフセットでこの損失関数を表すれば"と"のようになるかをここで調べておこう。

いま当該リンクに対応する本来の相対オフセットを ${}^v\theta^{m,n}$ とすると損失関数は ${}^vg^{m,n}({}^v\theta^{m,n}, {}^vg^{m,n})$ のように表わされる。ここで、 ${}^v\theta^{m,n}$ は交差点 (m, n) の垂直方向リンクに対する青信号開始時刻を $\gamma^{m,n}$, 交差点 $(m+1, n)$ の垂直方向リンクに対する青信号開始時刻を $\gamma^{m+1,n}$ としたとき

$${}^v\theta^{m,n} = \gamma^{m,n} - \gamma^{m+1,n} \quad (3.5.1)$$

となる。

ここでいま交差点 (m, n) の垂直方向リンクに対する赤信号の周期長に占める比率を $S^{m,n}$ とすると、先に定義した $\xi^{m,n}$ と $\gamma^{m,n}$ との関係は

$$\gamma^{m,n} = \xi^{m,n} + S^{m,n} \cdot C \quad (3.5.2)$$

C ; 周期長

のようになる。したがって、式(3.5.2)を式(3.5.1)に代入すると

$$\begin{aligned} {}^v\theta^{m,n} &= (\xi^{m,n} + S^{m,n} \cdot C) - (\xi^{m+1,n} + S^{m+1,n} \cdot C) \\ &= (\xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}) + (S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C \end{aligned}$$

が得られ、さらにここで ${}^v\theta^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}$ であったことを考慮すると、けっきょく

$${}^v\theta^{m,n} = {}^v\theta^{m,n} + (S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C$$

となる。

したがって、損失関数が $v_{\theta^{m,n}}$ との関係で、 $v_{g^{m,n}}(v_{\theta^{m,n}}, v_{g^{m,n}})$ のように表わされていれば、それを本来の相対オフセット $v_{\theta^{m,n'}}$ で表わすと $v_{g^{m,n}}(v_{\theta^{m,n'}} - (S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C, v_{g^{m,n}})$ になるわけであり、それはつまり $v_{g^{m,n}}(v_{\theta^{m,n'}}, v_{g^{m,n}})$ を θ 軸に沿って $(S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C$ だけ右に平行移動しただけの形になっているということである。このようなことから解析の便宜上、垂直方向リンクに対する相対オフセットを赤信号を基準としたものにとっても何ら支障がないことがわかる。

以上のような準備のもとに、図-3.5.2 で与えられる格子状街路網に対して、系統制御の効果が全体として最も大きくなるような最大ツリーの形成方法について考えるが、一般にあるネットワークがあって、その中に含まれる各リンクに何らかの重みが付されている場合に、リンクのウェイトの総和が最大になるような最大ツリーの決定方法は、ウェイトの大きいリンクから、ループがずいじないよう順々に採っていったときに得られるツリーとして決めればよいということがわかっている⁵⁴⁾。ここで与えられている問題は、各リンク内で発生する交通損失がそのリンクに対応する相対オフセットのみに関係していることが前提となっているので、リンクにウェイトが与えられた問題と何ら変わるところがない。したがって、上記の方法をそのまま適用することにする。

各リンクのウェイトとしては、当然のことながら系統制御による効果量を採ればよいわけであるが、その効果量としてここではつぎのようなものを考える。

すなわち、いまあるリンクが系統制御されるとすれば、3.3.1 で述べたように、必ず損失最小に対応するオフセット θ^* の設定が可能であるから、この最小損失はそのリンクがツリー

に組み込まれた場合の損失ということになる。一方、もしこのリンクがツリーに組み込まれず、系統制御の対象からはずされた場合には、いかなる大きさの交通損失がそのリンク内に発生するであろうか。これについてはそのリンクに対応する相対オフセットが与えられない限り、その大きさの予測は不可能であるから、最も妥当な値として、そのリンクに対応する損失 $g(\theta, f)$ の θ についての平均値（これを $g(f)$ とする）を採ることが考えられる。なぜならば、そのリンクの相対オフセットは、ツリーに対するオフセットづけの結果、自動的に決まってしまう性格のもので、交通状態との関連からその変域全体にわたって種々の値をとることが考えられるからである。

このようにして、あるリンクに対してツリーに組み込まれて系統制御が行なわれる場合の損失とそうでない場合の損失が与えられると、そのリンクの制御効果量は両者の差として評価できることになる。すなわち、 $g(f) - g(\theta^*, f)$ なる量である。このことを、図-3.5.2 に示した街路網における交差点 (m, n) と交差点 $(m, n+1)$ にはさまれるリンクについて、一般的に書けば

$$\text{リンクの効果量} = {}^h g^{m,n}({}^h f^{m,n}) - {}^h g^{m,n}({}^h \theta^{m,n*}, {}^h f^{m,n})$$

となる。ここに ${}^h g^{m,n}({}^h f^{m,n})$ は ${}^h g^{m,n}({}^h \theta^{m,n}, {}^h f^{m,n})$ の ${}^h \theta^{m,n}$ についての平均値、 ${}^h \theta^{m,n*}$ は損失最小に対応する相対オフセットである。

したがって、前述したことから効果量が最も大きくなる最大ツリーは、上式で表わされるような効果量が最も大きいリンクから順に、ループができないように、つぎつぎとリンク

を選んでゆくことによって、容易に求められるのである。

すなわち、まず最初のリンクは

$$\max_{\substack{h_{m,n} \in G \\ v_{s,r} \in G}} \left[\sum_{v=1}^2 \left\{ g_v^{h_{m,n}}(g_v^{h_{m,n}}) - g_v^{h_{m,n}}(\theta^*, g_v^{h_{m,n}}) \right\}, \sum_{v=1}^2 \left\{ g_v^{v_{s,r}}(g_v^{v_{s,r}}) - g_v^{v_{s,r}}(\theta^*, g_v^{v_{s,r}}) \right\} \right]$$

より決定される。ここに、 G_i は G から第 i 番目に選ばれたリンクをとり除いたリンク集合である。以下同様にして、ループが生じないという条件で同様の操作を続けてゆく、残されたリンクの集合 G_i で、 $i = MN - 1$ となった時点で計算を終了すればよい。なぜならば、対象街路網の交差点総数が MN であるから、それらをすべて含んだ最大ツリーのリンク数は $(MN - 1)$ となるからである。

このようにして、最適な最大ツリーが形成されると、その中での系統制御は上にも述べたように、単におのおののリンクにおいて損失最小に対応する相対オフセット θ^* を設定するだけでよいことになる。

第2章で検討したように、交通量が多くなってくると、街路区間相互の交通損失の独立性が成立するわけであるから、かかる場合には上述の方法によってツリー形成ならびにオフセットパターンの決定を行なって、対象街路網の制御をしこもさしつかえないであらう。

3.5.2 隣接区間の相対オフセットの影響を考慮した場合

さて、つぎに、ある街路区間で発生する交通損失が、当該区間の相対オフセットのみならず隣接区間の相対オフセットにも影響を受けると仮定した場合には、上で検討したような最適な最大ツリーの形成はいかなる方法によればよいであろう

うか。

それに先立ち、任意の最大ツリーの損失最小の規準による最適化をDPによって行なう方法について考えてみる。そのために、まず図-3.5.2に示した街路網を図-3.5.3のように、 $1, 2, \dots, N$ の合計 N 個の区間に分割する。

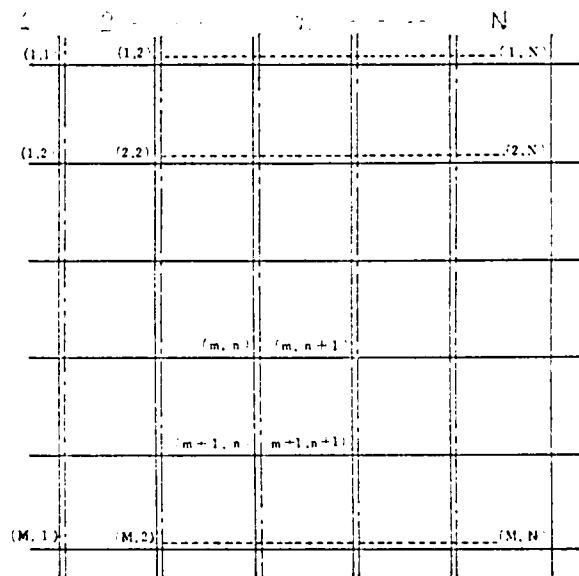


図-3.5.3 対象格子状街路網の分割

$$h_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n-1}, \theta^{m,n}, \theta^{m-1,n},$$

$\theta^{m,n}, g_1^{m,n})$; $g_1^{m,n}$ が、当該区間の相対オフセットが $\theta^{m,n}$ 、関連隣接区間の相対オフセットが $\theta^{m,n-1}$, $\theta^{m-1,n}$, $\theta^{m,n}$ であるときに被る損失

$v_{g_1}^{m,n}(\theta^{m-1,n}, \theta^{m,n}, \theta^{m,n-1}, \theta^{m,n}, g_1^{m,n})$; $g_1^{m,n}$ が、当該区間の相対オフセットが $\theta^{m,n}$ 、関連隣接区間の相対オフセットが $\theta^{m-1,n}$, $\theta^{m,n-1}$, $\theta^{m,n}$ であるときに被る損失

$$(m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N)$$

ただし、対象街路網中のリンクに対応しない相対オフセットについてはそれを取り除いたものを考えるものとし、また対象街路網中に存しないような交通に対する損失については、それを0と定義するものとする。 $h_{g_2}^{m,n}()$, $v_{g_2}^{m,n}()$ につい

では上の定義に準ずるものとする。

また、新しい変数としてつぎのようなものを定義する。

$h^{m,n}$; 交差点 (m, n) と交差点 $(m, n+1)$ にはさまれたリンクが最大ツリーに組み込まれた場合 1, そうでない場合 0 となる変数

$v^{m,n}$; 交差点 (m, n) と交差点 $(m+1, n)$ にはさまれたリンクが最大ツリーに組み込まれた場合 1, そうでない場合 0 となる変数

この変数についても対象街路網中に存在しないリンクに対応するものについてはすべて 0 とする。

さらに,

$f_n(h^{\theta^{n-2}}, v^{\theta^{n-1}})$; 第 $(n-1)$ 区間における相対オフセットが $h^{\theta^{n-2}}, v^{\theta^{n-1}}$ であるという条件のもとで, 第 n 区間から第 N 区間の相対オフセットの最適化を行なった場合に, それから $(N-n+1)$ 個の区間内に存する最大ツリーに含まれるリンクにおいて発生する損失の総計。ここに, $h^{\theta^{n-1}}, v^{\theta^{n-1}}$ はそれぞれ M 次元ベクトル, $(M-1)$ 次元ベクトルで, 具体的にはつぎのようなものである。

$$h^{\theta^{n-2}} = (h^{\theta^{1,n-2}}, h^{\theta^{2,n-2}}, \dots, h^{\theta^{M,n-2}})$$

$$v^{\theta^{n-1}} = (v^{\theta^{1,n-1}}, v^{\theta^{2,n-1}}, \dots, v^{\theta^{M-1,n-1}})$$

$$(n = 3, 4, \dots, N)$$

を定義する。

以上のような準備のもとに最適化に着手するが, その過程において相対オフセットに関する 1 つの条件式を考慮する必要がある。すなわち, 基本ループ (ループを含まないループ) を構成するリンクに対応する 4 つの相対オフセットに関して,

次式のような等式が成立する。これをループに沿う相対オフセットの実現条件式あるいはループ閉合条件式とよぶ。

$$\overset{v}{\theta}^{m,n} + \overset{h}{\theta}^{m+1,n} - \overset{v}{\theta}^{m,n+1} - \overset{h}{\theta}^{m,n} = 0 \quad (3.5.3)$$

$$(m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N-1)$$

なぜならば、定義にしたがえば各相対オフセットは、絶対オフセット $\xi^{m,n}$ を使って表わすと

$$\overset{v}{\theta}^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}$$

$$\overset{h}{\theta}^{m+1,n} = \xi^{m+1,n} - \xi^{m+1,n+1}$$

$$\overset{v}{\theta}^{m,n+1} = \xi^{m,n+1} - \xi^{m+1,n+1}$$

$$\overset{h}{\theta}^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m,n+1}$$

となるから、これらの関係を式(3.5.3.)の左辺に代入すれば、明らかにその等式が成立する。

式(3.5.3)に示したような相対オフセットの条件式を考慮することは計算量を減らすことになり好都合である。

さて、最適化はまず第 N 区間から始める。すなわち、関数 $f_N(\cdot)$ の定義より

$$\begin{aligned} f_N(\overset{h}{\theta}^{N-2}, \overset{v}{\theta}^{N-1}) = \min_{\substack{\overset{h}{\theta}^{N-1}, \overset{v}{\theta}^N}} & \left[\sum_{m=1}^M \lambda^m \left\{ g_1^{m,N-1}(\overset{h}{\theta}^{m,N-2}, \overset{h}{\theta}^{m,N-1}, \overset{v}{\theta}^{m-1,N-1}, \right. \right. \\ & \left. \left. \overset{v}{\theta}^{m,N-1}, \overset{h}{g}_1^{m,N-1}) + g_2^{m,N-1}(\overset{h}{\theta}^{m,N-1}, \overset{v}{\theta}^{m-1,N}, \overset{v}{\theta}^{m,N}, \overset{h}{g}_2^{m,N-1}) \right\} \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{M-1} \lambda^m \left\{ g_1^{m,N}(\overset{h}{\theta}^{m-1,N}, \overset{v}{\theta}^{m,N}, \overset{h}{\theta}^{m,N}, \overset{v}{g}_1^{m,N-1}) + g_2^{m,N}(\overset{h}{\theta}^{m,N}, \right. \right. \\ & \left. \left. \overset{v}{\theta}^{m,N}, \overset{h}{\theta}^{m+1,N-1}, \overset{v}{g}_2^{m,N}) \right\} \right] \quad (3.3.4) \end{aligned}$$

となる。

探索すべき相対オフセットは ${}^k\theta^{N-1}$, ${}^v\theta^N$ あわせて $(2M-1)$ 個であるが, ${}^v\theta^{N-1}$ との関連において合計 $(M-1)$ 個の基本ループに沿う条件式が成立する。すなわち, 式 (3.5.3) を利用すると

$${}^v\theta^{m,N-1} + {}^k\theta^{m+1,N-1} - {}^v\theta^{m,N} - {}^k\theta^{m,N-1} = 0$$

$$(m = 1, 2, \dots, M-1)$$

となる。したがって, $(2M-1) - (M-1) = M$ 個だけが独立な相対オフセットということになり, けっきょく, ${}^k\theta^{N-1}$ および ${}^v\theta^N$ のうちループを構成しない任意の M 個についてのみ探索すればよいことがわかる。式 (3.5.4) から得られる f_N およびそれに対応する ${}^k\theta^{N-1}$, ${}^v\theta^N$ をすべて記憶しておく。この場合の θ をとくに ${}^k\theta^{N-1}$, ${}^v\theta^N$ と書き表わす。

つぎに, 第 $(N-1)$ 区間の最適化を行なうが, このためには最適性の原理により, 式 (3.5.4) で与えられる $f_N({}^k\theta^{N-2}, {}^v\theta^{N-1})$ を利用した繰り返しとの関係をつくらばよい。すなわち,

$$\begin{aligned} f_{N-1}({}^k\theta^{N-3}, {}^v\theta^{N-2}) = & \min_{{}^k\theta^{N-2}, {}^v\theta^{N-1}} \left[\sum_{m=1}^M {}^k\ell^{m,N-2} \{ {}^k g_1^{m,N-2}({}^k\theta^{m,N-3}, {}^k\theta^{m,N-2}, {}^v\theta^{m-1,N-2}, \right. \\ & {}^v\theta^{m,N-2}, {}^k g_1^{m,N-2}) + {}^k g_2^{m,N-2}({}^k\theta^{m,N-1}, {}^k\theta^{m,N-2}, {}^v\theta^{m-1,N-1}, {}^v\theta^{m,N-1}, {}^k g_2^{m,N-2}) \} \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} {}^v\ell^{m,N-1} \{ {}^v g_1^{m,N-1}({}^v\theta^{m-1,N-1}, {}^v\theta^{m,N-1}, {}^k\theta^{m,N-2}, {}^k\theta^{m,N-1}, {}^v g_1^{m,N-1}) \\ & \left. + {}^v g_2^{m,N-1}({}^v\theta^{m-1,N-1}, {}^v\theta^{m,N-1}, {}^k\theta^{m+1,N-2}, {}^k\theta^{m+1,N-1}, {}^v g_2^{m,N-1}) \} + f_N({}^k\theta^{N-2}, {}^v\theta^{N-1}) \right] \end{aligned}$$

となる。これより ${}^k\theta^{N-3}$, ${}^v\theta^{N-2}$ のあらゆる組み合わせについて f_{N-1} およびそれに対応する ${}^k\theta^{N-2}$, ${}^v\theta^{N-1}$ を求めておく。

上の計算においても, 前と同様にループに沿う相対オフセットの実現条件式を考慮して, ${}^k\theta^{N-2}$, ${}^v\theta^{N-1}$ のうち M 個の独立

$$\begin{aligned}
& + g_2^{m,1}(\theta^{m,2}, \theta^{m,1}, \theta^{m+1,2}, \theta^{m,2}, g_2^{m,1}) \} + \sum_{m=1}^{M-1} \{ g_1^{m,2}(\theta^{m,2}, \\
& \theta^{m,2}, \theta^{m,1}, \theta^{m,1}, g_1^{m,2}) + g_2^{m,2}(\theta^{m+1,2}, \theta^{m,2}, \theta^{m+1,1}, \theta^{m+1,2}, \\
& g_2^{m,2}) \} + f_3(\theta^1, \theta^2)]
\end{aligned}$$

すなわち、 $f_2(\theta^1)$ は θ^1 の一組の値に対する与えられた最大ツリー内で発生する総損失の最小値を表わす。

したがって、この最後の段階で計算された $f_2(\theta^1)$ のうちで最も小さい f_2 を求めると、それに対応する θ^1 は第1区間における絶対最適政策となる。いまこれを $\theta^{*1} = (\theta^{*1,1}, \theta^{*1,2}, \dots, \theta^{*1,M-1})$ と表わす。そうすると第2区間における最適相対オフセットは $f_2(\theta^{*1})$ に対応する θ^2, θ^{*2} として求められる。これを θ^{*2} と表わす。以下同様にして、第 N 区間に向かつて、先に求めてあった f_3, f_4, \dots, f_M とそれらに対応する各区間の条件付き最適オフセット θ を調らべてゆくことにより、すべての区間における最適相対オフセット $\theta^{*n-1}, \theta^{*n}$ ($n = 2, 3, \dots, N$) が決定される。すなわち、与えられた最大ツリー内の総損失を最小にするオフセットパターンが求められたことになる。

以上の方法を、対象街路網に対して考えられるあらゆる最大ツリーに適用し、その中で最も好ましいと思われる最大ツリーをもって最適な最大ツリーとすればよいが、一般には最大ツリーの数が膨大であり、したがってそうした方法は効率的でない。

以下においては、このような問題を克服するために、ランダムサーチ法を用いた方法について検討してみる。

ところで最適性の規準には、3.5.1と同様な考え方による

制御効果量をとる。すなわち，水平方向リンクについて説明するものとするとき，いま

$$h_{g_1}^{m,n}(h_{g_1}^{m,n}) ; h_{g_1}^{m,n}(h_{\theta}^{m,n-1}, h_{\theta}^{m,n}, v_{\theta}^{m-1,n}, v_{\theta}^{m,n}, h_{g_1}^{m,n}) \text{ の } \theta^{m,n-1},$$

$$h_{\theta}^{m,n}, v_{\theta}^{m-1,n}, v_{\theta}^{m,n} \text{ に関する平均値}$$

$$h_{g_2}^{m,n}(h_{g_2}^{m,n}), v_{g_1}^{m,n}(v_{g_1}^{m,n}), v_{g_2}^{m,n}(v_{g_2}^{m,n}) ; \text{ 上の定義に準ずる。}$$

としたとき， $\{h_{g_1}^{m,n}(h_{g_1}^{m,n}) - h_{g_1}^{m,n}(h_{\theta}^{m,n-1}, h_{\theta}^{m,n}, v_{\theta}^{m-1,n}, v_{\theta}^{m,n}, h_{g_1}^{m,n})\}$ なる量を効果量とするわけである。したがって，交差点 (m, n) と交差点 $(m, n+1)$ の間のリンクに対する効果量は，上に示した量を $h_{g_1}^{m,n}, h_{g_2}^{m,n}$ について計算しそれらを加え合わせたものである。いま，その効果量の最大値を $E^{m,n}$ で表わすことにする。この値は後の計算のステップで用いるもので，その大きさ自体はそれほど厳密さが要求されないから，もし真の意味における $E^{m,n}$ の計算が複雑な場合には，当該リンク以外のリンクに対する相対オフセットを適当に与え，その状態で $E^{m,n}$ について最大化を行なうことによって求めても差しつかえない。

まず，ランダムな最大ツリーの形成方法であるが，これは一様乱数を用いることにより容易に行なうことができる。すなわち，いま $0 \sim 1$ の一様乱数を用いるとしたとき，各リンクに $0 \sim 1$ の間を等間隔に区切ったしきい値を対応させる。間隔の大きさは対象街路網のリンク総数が $\{2MN - (M+N)\}$ であるから，その逆数を単位として決めればよい。そして，発生した乱数 r が，

$$S_i < r \leq S_{i+1}$$

$$(i = 1, 2, \dots, \{2MN - (M+N) - 1\})$$

なる範囲にあったとき、 S_{i+1} に対応するリンクを選ぶ。ここに、 S_i はしきい値である。このようにして選ばれたリンクが、それ以前にすでに選ばれているリンクとループを構成する場合、そのリンクを選ぶことはやめ、別の新しい乱数で他のリンクを選ぶようにする。このような手順で、 $(MN-1)$ 個のリンクが選ばれると、それはとりも直さず最大ツリーを形成することになる。

このようにして、1つのランダムな最大ツリーが与えられたならば、その最大ツリーに含まれるリンクに対応する変数 l を1、それ以外のリンクに対応する変数 l を0とおき、先に述べた方法によって、そのツリーの損失最小のオフセットパターンを決める。そうすると、最初の最大ツリーの制御効果量 E_1 が

$$\begin{aligned}
 E_1 = & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} h^{m,n} \left[\left\{ h_{g_1}^{m,n}(h_{g_1}^{m,n}) - h_{g_1}^{m,n}(h_{\theta^{*m,n-1}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m,n}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m+1,n}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m,n}}^{*m,n}, \right. \right. \\
 & h_{g_1}^{m,n}) \left. \right\} + \left\{ h_{g_2}^{m,n}(h_{g_2}^{m,n}) - h_{g_2}^{m,n}(h_{\theta^{*m,n+1}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m,n}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m+1,n+1}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m,n+1}}^{*m,n}, \right. \\
 & h_{g_2}^{m,n}) \left. \right\} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N v^{m,n} \left[\left\{ v_{g_1}^{m,n}(v_{g_1}^{m,n}) - v_{g_1}^{m,n}(v_{\theta^{*m+1,n}}^{*m,n}, v_{\theta^{*m,n}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m,n-1}}^{*m,n}, \right. \right. \\
 & h_{\theta^{*m,n}}^{*m,n}, v_{g_1}^{m,n}) \left. \right\} + \left\{ v_{g_2}^{m,n}(v_{g_2}^{m,n}) - v_{g_2}^{m,n}(v_{\theta^{*m+1,n}}^{*m,n}, v_{\theta^{*m,n}}^{*m,n}, h_{\theta^{*m+1,n-1}}^{*m,n}, \right. \\
 & h_{\theta^{*m+1,n}}^{*m,n}, v_{g_2}^{m,n}) \left. \right\} \left. \right] \quad (3.5.6)
 \end{aligned}$$

として計算される。

この段階で、つぎのランダムな最大ツリーを選ぶが、今度は直接式(3.5.6)を用いて制御効果量 E_2 を計算せずに、まず

$$E_2' = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \lambda^{m,n} E^{m,n} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N \lambda^{m,n} E^{m,n}$$

を求め、 $E_2' > E_1$ なるとき、はいめて E_2 を計算する。すなわち、 E_2' は選ばれた最大ツリーに対する効果量の上限であるから、 $E_2' \leq E_1$ ならば、最初のツリーに対する効果量 E_1 より小さいならば、それ以上の計算を要しないという判断である。こうして計算された E_2 が E_1 より大きい場合には、第2番目のステップでは最大ツリーを1回だけ探索したことを記憶するために変数 K_2 を導入し、

$$K_2 = 1$$

とおく。

$E_2' \leq E_1$ あるいは $E_2' > E_1$ かつ $E_2 \leq E_1$ の場合には新たに別のランダム最大ツリーを形成し、同様の手順をとる。もし、この段階で $E_2 > E_1$ となれば、上の変数 K_2 は

$$K_2 = 2$$

となる。そうでない場合には、さらに新たなランダム最大ツリーを形成して計算を進めなければならない。

同様な考えから、 (E_3, K_3) , (E_4, K_4) , ..., (E_i, K_i) ... がつぎつぎに求められてゆくが、この関係をグラフ化するために E_i を縦軸に、また $\sum_{j=1}^i K_j$ を横軸にとったものを考えると図-3.5.4のように書けるであろう。ここに、 $K_1 = 0$ とする。一般的傾向としては、 K_i は漸増し、反対に $(E_i - E_{i-1})$ は漸減することが予想される。

いずれにしても、このようにして計算を進めてゆく過程で、 K_i がある定められた値以上になったならば、あるいは $(E_i - E_{i-1})$ が

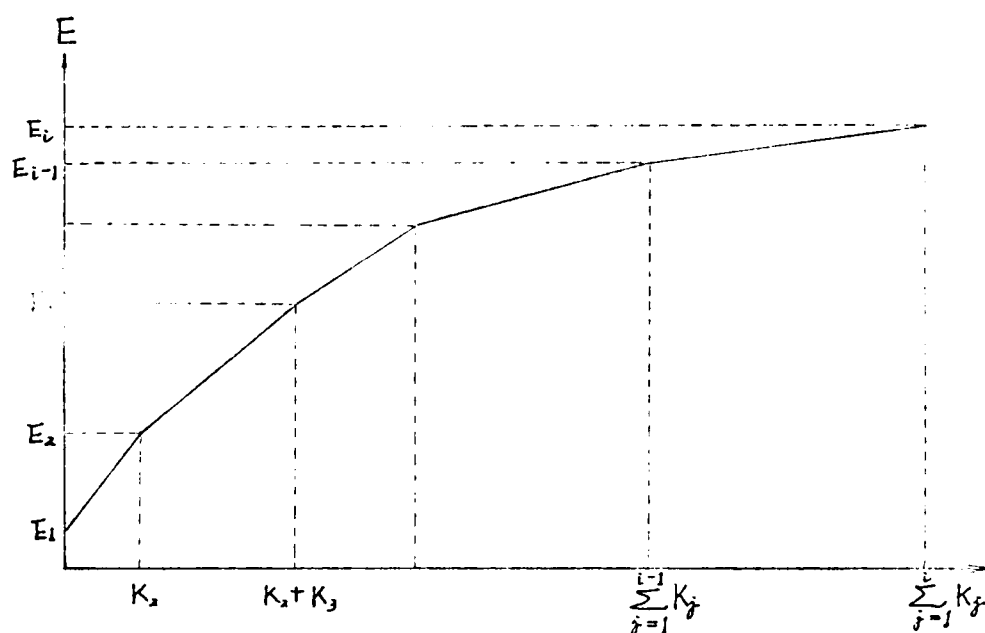


図-3.5.4 ランダムサーチによる制御効果量とステップ数の関係

— E_{i-1}) または $(E_i - E_{i-1})/K_i$ がある定められた値以下になつたならば, その時点で計算を打ち切り, その段階での最大ツリーを最適な最大ツリーとみなすのである。

本方法は, 必ずしも最適な最大ツリーを与えることを保証するものではないが, ここに与えられたような問題に対しては他に有効な方法がないことを考えればやむを得ないことであると言えよう。

このようにして, ある街路区間で発生する交通損失が, 隣接区間の相対オフセットにも影響されるという仮定をおいた場合においても, 近似的な意味における最適な最大ツリーおよびそれに対するオフセットパターンを求め得ることがわかったが, 系統制御が必要とされるような交通需要の範囲では, ほとんど街路区間相互の交通損失の独立性が成立することが予想されるわけであり, また仮りにそうでないにしても, スループバンド方式が適するような低い交通需要でない限り, 交通の不規則性, 不確定性を考えれば, 隣接区間の相対オフセ

ットをも考慮した損失関数をもちこんでも無意味になる恐れがあることから、やはり交通損失の区間による独立性を前提とせざるを得ないと思われるので、実際の信号制御に対して、このような方法が要求されることは少ないと言えよう。

3.3.3 ツリー形成方式の制御と交通のOD分布、配分との関連

上では、対象街路網に現在流れている交通量を対象として、最適な最大ツリーを形成する方法を議論したが、現在流れている交通量はそのすべてが、本来の希望ルートを通っているとは考えられない。つまり希望するルートの信号制御が極めて非効率に作動しているために、迂回ルートをとっている車も多くあると考えられるのである。したがって、そうした交通量を前提とした最大ツリーの形成は、必ずしも本来的な意味において最適なツリー形成ではなくなってくる可能性がある。このようなことから、ツリー形成を行なう前に、まず対象街路網を流れる車のOD分布を調らべ、街路容量を理想的な値と仮定して、それを対象街路網に配分する。そうすると、その時点における各街路区間の配分交通量は、潜在的な需要交通と考えられるので、この需要交通を前提としてツリー形成を行なえば、配分交通量もそれに沿うように変化してくることが予想され、したがって、本来的に望ましいツリー形成制御が作動し、効果を発揮することになる。

配分交通量に保守性があり、信号制御のいかんによって個々の車が選ぶルートがそれほど変わらないと判断される場合には、このような煩雑な過程を経ることなく、現に流れている交通量を対象としてもよいことは言をまたない。

3.6 結語

本章では、まず路線を対象としたオフセット最適化の方法として、 DP を用いたスループント最大化の方法を述べた。この種の問題は、従来から多くの研究者が検討を加えているものであるが、ここに示した DP による方法は、各区間の走行速度を任意に与えた場合にも適用できること、また、区間速度自身を決定変数として取扱かえることなど、より一般性があることに特徴を有するが、計算量が従来の方法に比べて極めて多くなるという欠点をもっている。

つぎに、同じく路線を対象に、総損失最小規準によるオフセット設定法を述べたが、1つの街路区間で発生する交通損失が、隣接区間に対応する相対オフセットの影響を受ける場合には、 DP あるいは離散型最大原理などの数学的手法の導入が必要となるが、当該区間の相対オフセットのみに影響されるような場合には、各区間ごとに独立に最適化を図ればよく、計算は極めて容易であることがわかった。車群の波形をたとえば矩形波として扱うような制御方法は、実はこのことと同一のことである。

いずれにしても、従来からいわれているように、スループントを規準とした方法は交通量が少ない場合に適した方法であり、また、交通損失を規準とした方法は交通量が比較的多い場合に適した方法である。

これに対して、車群の再編成をねらったオフセット設定法は、待ち行列長がモデルの中に明確な形で組み込まれており、交差点間が短かく、待ち行列の後端が隣接交差点に及び易い区間など、待ち行列との関連で特別な条件を備えている街路区間について用いられるものであると考える。

また、ツリー形成による制御については、街路網の各区間に対応するオフセットの制御効果量なるものを定義して、最適なツリー形成を図る方法と、そのツリーに対するオフセットパターンを求める方法について述べたが、交通損失の街路区間相互の独立性が成立する場合には、効果量の大きい区間から順次選んでいってツリーをつくれれば、それがとりも直さず最適ツリーとなり、方法論的に極めて簡明であることがわかった。

ここに述べた方法は、すべて基礎的な観点から考察したものであり、実用化のためには多くの実験および調査を必要とする。

第4章 街路網を構成するループの信号最適化

4.1 概説

前章で検討した制御方式では、いずれも制御対象となる路線に含まれる街路区間については最も望ましいオフセットが設定されることが保証されるものの、制御対象からはずされた街路区間については、理論的には最適オフセットを設定することは不可能であり、したがって、そこを流れる交通が停滞を余儀なくされることも考えられる。このことは、基本的には1つのループに沿う相対オフセットの実現可能条件に起因している。すなわち、いま図-4.1.1のような基本ループ

を対象に路線系統オフセットを設定する場合を考えてみると、まず、交差点 (m, n) と交差点 $(m, n+1)$ の間のリンクについては、街路区間相互の交通損失の独立性を前提とすれば、その最適相対オフセットの設定は、前章に述べたような方法により、

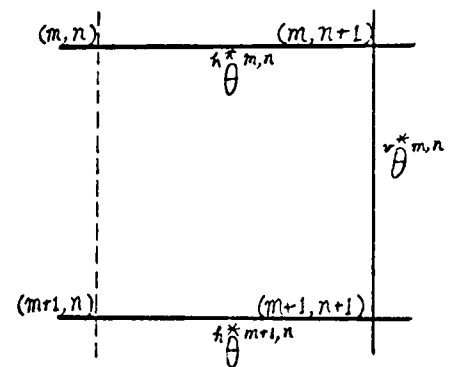


図-4.1.1 ループに沿うオフセット

容易に行なうことができる。これをいま $\theta^{*m,n}$ とする。同様にして、交差点 $(m, n+1)$ と交差点 $(m+1, n+1)$ の間、および交差点 $(m+1, n)$ と交差点 $(m+1, n+1)$ の間のリンクについても、それぞれに対する最適相対オフセット $\theta^{*m,n+1}$, $\theta^{*m+1,n}$ を設定することは極めて容易に行なわれる。しかしながら、最後に残った交差点 (m, n) と交差点 $(m+1, n)$ の間のリンクについては、もはやオフセットづけをするまでもなく、先に決定された3つのリンクに対応する最適相対オフセットによって、自動的にその相対オフセットが与えられてしまうのである。すなわち、前章式(3.5.3)より

$$\theta^{m,n} = \theta^{*,m,n+1} + \theta^{*,m,n} - \theta^{*,m+1,n}$$

となる。このようにして与えられる $\theta^{m,n}$ が、当該リンクを独立に最適化したときに得られる相対オフセット $\theta^{*,m,n}$ に一致する保証はまったくないわけである。

したがって、このような問題を解決するための一つの方法として、対象とするループ全体の評価規準を最適化するオフセット設定法が考えられる。このような方法に従えば、上に述べたような路線系統方式によるオフセット設定に比べて、理論的には必ずループ全体としてみた制御効率が向上することは保証されるのである。

全体的最適化によるオフセット設定は、原理的には縦横の相対オフセットを相互に適切に考慮しつつ行なえばよく、図-4.1.1に示したようなループであれば、あらゆるオフセットパターンを羅列して、そのうちで最も望ましいパターンを見つけるという簡明な方法によることもできよう。しかしながら、前章図-3.5.2に示したような一般的な街路網に対しては、このような単純な方法は極めて非効率になり、実際に用いることは不可能に近くなる。

いずれにしても、ループを含む街路網の全体的最適化の規準によるオフセットパターン設定の問題は、基本的には図-4.1.1に示した基本ループのオフセットづけの問題に帰するものである。

本章では、こうしたループを含む街路網の最適化を基盤とした最適制御におけるオフセットパターン決定の問題について、いくつかのOR的手法を用いて、基礎的な考察を行なう。

4.2 動的計画法を用いたスループント最大化の手法

ループを含む街路網を対象としたスループントの最大化の手法については、第1章でも触れたように、J. D. C. Little³⁵⁾がすでに混合整数型の線形計画法を用いた方法を開発しているが、ここでは、前章第2節と同様に、DPを応用した別解法ともいえるべき方法を示すことにする。

まず、3.2の定義に準じてつぎの記号を定義する。

$h\delta_v^{m,n}$; 交差点 (m, n) における水平方向で、 $h\delta_v^{m,n}$ が流れる方向に対する δ

$he_v^{m,n}$; 同方向に対する e

$hB_v^{m,n}$; 同方向に対する B

$v\delta_v^{m,n}$; 交差点 (m, n) における垂直方向で、 $v\delta_v^{m,n}$ が流れる方向に対する δ

$ve_v^{m,n}$; 同方向に対する e

$vB_v^{m,n}$; 同方向に対する B

($v = 1, 2$)

そうすると、各変数は隣接交差点相互間において、つぎのような関係で結ばれる。

$$h\delta_v^{m,n+1} = D_v^{m,n+1}(h\delta_v^{m,n}, he_v^{m,n}, hB_v^{m,n}, \theta^{m,n}) \quad (4.2.1)$$

$$he_v^{m,n+1} = E_v^{m,n+1}(h\delta_v^{m,n}, he_v^{m,n}, hB_v^{m,n}, \theta^{m,n}) \quad (4.2.2)$$

$$hB_v^{m,n+1} = F_v^{m,n+1}(h\delta_v^{m,n}, he_v^{m,n}, hB_v^{m,n}, \theta^{m,n}) \quad (4.2.3)$$

($m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N-1$)

$$v\delta_v^{m+1,n} = D_v^{m+1,n}(v\delta_v^{m,n}, ve_v^{m,n}, vB_v^{m,n}, \theta^{m,n}) \quad (4.2.4)$$

$${}^{\nu}e_y^{m+1,n} = {}^{\nu}E_y^{m+1,n}({}^{\nu}\delta_y^{m,n}, {}^{\nu}e_y^{m,n}, {}^{\nu}B_y^{m,n}, {}^{\nu}\theta^{m,n}) \quad (4.2.5)$$

$${}^{\nu}B_y^{m+1,n} = {}^{\nu}F_y^{m+1,n}({}^{\nu}\delta_y^{m,n}, {}^{\nu}e_y^{m,n}, {}^{\nu}B_y^{m,n}, {}^{\nu}\theta^{m,n}) \quad (4.2.6)$$

$$(m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N)$$

上記の関数の意味は、3.2で説明したとおりである。

さらに、つぎの記号を定義する。

${}^h w_y^m$; 水平方向第 m 番目の路線の ν 方向に対するスループバンドのウェイト ${}^h w_y^m$ を要素にもつ2次元ベクトル ($\nu=1, 2$)

${}^{\nu} w_y^n$; 垂直方向第 n 番目の路線の ν 方向に対するスループバンドのウェイト ${}^{\nu} w_y^n$ を要素にもつ2次元ベクトル ($\nu=1, 2$)

$f_n({}^h\delta_1^n, {}^he_1^n, {}^hB_1^n, {}^h\delta_2^n, {}^he_2^n, {}^hB_2^n, {}^{\nu}\theta^n)$; 垂直方向第 n 番目の路線における水平方向に対する各変数が、それぞれ ${}^h\delta_1^n, {}^he_1^n, {}^hB_1^n, {}^h\delta_2^n, {}^he_2^n, {}^hB_2^n, {}^{\nu}\theta^n$ であるという条件下で、第 n 区間から第 N 区間までのオフセットを最適化したときの、それら $(N-n+1)$ 個の区間におけるウェイトつけされたスループバンドの総和

ここに、

$${}^h\delta_y^n = ({}^h\delta_y^{1,n}, {}^h\delta_y^{2,n}, \dots, {}^h\delta_y^{M,n})$$

$${}^he_y^n = ({}^he_y^{1,n}, {}^he_y^{2,n}, \dots, {}^he_y^{M,n})$$

$${}^hB_y^n = ({}^hB_y^{1,n}, {}^hB_y^{2,n}, \dots, {}^hB_y^{M,n})$$

$$(\nu=1, 2)$$

$${}^{\nu}\theta^n = ({}^{\nu}\theta^{1,n}, {}^{\nu}\theta^{2,n}, \dots, {}^{\nu}\theta^{M-1,n})$$

とするが, ${}^h\delta_v^n, {}^hB_v^n$ は要素となっているベクトルの要素がそのまゝ横に並べられたベクトルである
と約束する。

さて, この $f_n(\cdot)$ なる関数を用い, 最後の第 N 区間から最適化を開始する。すなわち

$$f_{N-1}({}^h\delta_1^{N-1}, {}^h\epsilon_1^{N-1}, {}^hB_1^{N-1}, {}^h\delta_2^{N-1}, {}^h\epsilon_2^{N-1}, {}^hB_2^{N-1}, {}^v\theta^{N-1}) = \max_{{}^h\theta^{N-1}, {}^v\theta^N} \left[\sum_{m=1}^M \{ {}^hW_1^m {}^hB_1^{m,N} + {}^hW_2^m {}^hB_2^{m,N} \} + ({}^vW_1^N {}^vB_1^{M,N} + {}^vW_2^N {}^vB_2^{M,N}) \right]$$

が成立するが, 式(4.2.3) および式(4.2.6) を考慮すると, けつよく

$$f_{N-1}({}^h\delta_1^{N-1}, {}^h\epsilon_1^{N-1}, {}^hB_1^{N-1}, {}^h\delta_2^{N-1}, {}^h\epsilon_2^{N-1}, {}^hB_2^{N-1}, {}^v\theta^{N-1}) = \max_{{}^h\theta^{N-1}, {}^v\theta^N} \left[\sum_{m=1}^M \{ {}^hW_1^m {}^hF_1^{m,N}({}^h\delta_1^{m,N-1}, {}^h\epsilon_1^{m,N-1}, {}^hB_1^{m,N-1}, {}^h\theta^{m,N-1}) + {}^hW_2^m {}^hF_2^{m,N}({}^h\delta_2^{m,N-1}, {}^h\epsilon_2^{m,N-1}, {}^hB_2^{m,N-1}, {}^h\theta^{m,N-1}) \} + \{ {}^vW_1^N {}^vB_1^{M,N}({}^v\theta^N) + {}^vW_2^N {}^vB_2^{M,N}({}^v\theta^N) \} \right] \quad (4.2.7)$$

となる。ここに, ${}^vB_v^{M,N}({}^v\theta^N)$ は, ${}^v\theta^N = ({}^v\theta^{1,N}, {}^v\theta^{2,N}, \dots, {}^v\theta^{M-1,N})$ を一組与えたとき, ${}^v\delta_v^{1,N}, {}^v\epsilon_v^{1,N}, {}^vB_v^{1,N}$ ($v=1, 2$) を種々に変化させたものについて式(4.2.4) ~ 式(4.2.6) を $m=1, 2, \dots, M-1$ の順に用いて計算される ${}^vB_v^{M,N}$ の最大値とする。常識的には ${}^v\delta_v^{1,N}=0$, ${}^v\epsilon_v^{1,N}=1$, ${}^vB_v^{1,N} = {}^vG_v^{1,N}$ ($v=1, 2$) に対する ${}^vB_v^{M,N}$ の値と解してよいであろう。(ここに, ${}^vG_v^{1,N}$ は当該交差点の垂直方向に対する青信号時間)。

式(4.2.7) の計算過程において, 前章式(3.2.8), 式(3.2.9) および式(3.5.3) に相当する条件を考慮しなければならないことはいうまでもない。

式(4.2.7)の関係から, $\delta_v^{N-1}, e_v^{N-1}, B_v^{N-1}$ ($v=1, 2$) および θ^{N-1} のあらゆる組み合わせに対する f_{N-1} とそれに対応する θ^{N-1} , θ^{N-1} がすべて計算される。いま, こうして求められた θ^{N-1} , θ^{N-1} を θ^{N-1} , θ^{N-1} と表わすことにする。これらはいずれも条件付きの最適政策であるから, 詳細には $\theta^{N-1}(\delta_1^{N-1}, e_1^{N-1}, B_1^{N-1}, \delta_2^{N-1}, e_2^{N-1}, B_2^{N-1}, \theta^{N-1})$, $\theta^{N-1}(\delta_1^{N-1}, e_1^{N-1}, B_1^{N-1}, \delta_2^{N-1}, e_2^{N-1}, B_2^{N-1}, \theta^{N-1})$ と書くこともできよう。

つぎに, 第 $(N-1)$ 区間の最適化に移る。このためには, 最適性の原理による繰り返えしの関係から, 式(4.2.7)で計算された $f_{N-1}(\cdot)$ を利用する。すなわち, 3.2 と同様の考え方から

$$\begin{aligned} f_{N-2}(\delta_1^{N-2}, e_1^{N-2}, B_1^{N-2}, \delta_2^{N-2}, e_2^{N-2}, B_2^{N-2}, \theta^{N-2}) = \max_{\theta^{N-2}, \theta^{N-1}} & \left[\{ W_1^{N-1} B_1^{M,N-1}(\theta^{N-1}) + W_2^{N-1} B_2^{M,N-1}(\theta^{N-1}) \} + f_{N-1}(\mathcal{D}_1(\delta_1^{N-2}, e_1^{N-2}, B_1^{N-2}, \theta^{N-2}), \right. \\ & E_1(\delta_1^{N-2}, e_1^{N-2}, B_1^{N-2}, \theta^{N-2}), F_1(\delta_1^{N-2}, e_1^{N-2}, B_1^{N-2}, \theta^{N-2}), \\ & \mathcal{D}_2(\delta_2^{N-2}, e_2^{N-2}, B_2^{N-2}, \theta^{N-2}), E_2(\delta_2^{N-2}, e_2^{N-2}, B_2^{N-2}, \theta^{N-2}), \\ & \left. F_2(\delta_2^{N-2}, e_2^{N-2}, B_2^{N-2}, \theta^{N-2}), \theta^{N-1}) \right] \end{aligned}$$

となり, この式から f_{N-2} およびそれに対応する第 $(N-1)$ 区間の相対オフセット θ^{N-2} , θ^{N-1} がすべて求められる。ただし,

$$\mathcal{D}_v(\delta_v^{N-2}, e_v^{N-2}, B_v^{N-2}, \theta^{N-2}) = (\mathcal{D}_v^{1,N-1}(\delta_v^{1,N-2}, e_v^{1,N-2}, B_v^{1,N-2}, \theta^{1,N-2}),$$

$$\mathcal{D}_v^{2,N-1}(\delta_v^{2,N-2}, e_v^{2,N-2}, B_v^{2,N-2}, \theta^{2,N-2}), \dots, \mathcal{D}_v^{M,N-1}(\delta_v^{M,N-2}, e_v^{M,N-2}, B_v^{M,N-2}, \theta^{M,N-2}))$$

($v=1, 2$)

とし、 E, F についても同様であるとする。

一般に、第 n 区間における最適化の過程はつぎのような繰り返しとの関係にしたかう。

$$f_n(\delta_1^n, e_1^n, B_1^n, \delta_2^n, e_2^n, B_2^n, \theta^n) = \max_{\theta^n, \theta^{n+1}} [\{ \overset{v}{w}_1^{n+1} \overset{v}{B}_1^{M,n+1}(\overset{v}{\theta}^{n+1}) + \overset{v}{w}_2^{n+1} \overset{v}{B}^{M,n+1}(\overset{v}{\theta}^{n+1}) \} + f_{n+1}(\overset{h}{D}_1^{n+1}(\delta_1^n, e_1^n, B_1^n, \theta^n), \overset{h}{E}_1^{n+1}(\delta_1^n, e_1^n, B_1^n, \theta^n), \overset{h}{F}_1^{n+1}(\delta_1^n, e_1^n, B_1^n, \theta^n), \overset{h}{D}_2^{n+1}(\delta_2^n, e_2^n, B_2^n, \theta^n), \overset{h}{E}_2^{n+1}(\delta_2^n, e_2^n, B_2^n, \theta^n), \overset{h}{F}_2^{n+1}(\delta_2^n, e_2^n, B_2^n, \theta^n), \overset{v}{\theta}^{n+1})]$$

この式を $n = N-2, N-3, \dots, 2$ の順に適用することによつて、 δ_v^n, e_v^n, B_v^n ($v=1, 2$) および θ^n のあらゆる組み合わせに対する f_n とそれに対応する θ^n, θ^{n+1} がすべて求められる ($n=2, 3, \dots, N-2$)。

そして最後に第1区間の最適化に対応してつぎのような関係式が成立する。

$$f_1(\delta_1', e_1', B_1', \delta_2', e_2', B_2', \theta') = \max_{\theta', \theta^2} [\{ \overset{v}{w}_1' \overset{v}{B}_1^{M,1}(\overset{v}{\theta}') + \overset{v}{w}_2' \overset{v}{B}_2^{M,1}(\overset{v}{\theta}') + \{ \overset{v}{w}_1^2 \overset{v}{B}_1^{M,2}(\overset{v}{\theta}^2) + \overset{v}{w}_2^2 \overset{v}{B}_2^{M,2}(\overset{v}{\theta}^2) \} + f_2(\overset{h}{D}_1^2(\delta_1', e_1', B_1', \theta'), \overset{h}{E}_1^2(\delta_1', e_1', B_1', \theta'), \overset{h}{F}_1^2(\delta_1', e_1', B_1', \theta'), \overset{h}{D}_2^2(\delta_2', e_2', B_2', \theta'), \overset{h}{E}_2^2(\delta_2', e_2', B_2', \theta'), \overset{h}{F}_2^2(\delta_2', e_2', B_2', \theta'), \overset{v}{\theta}^2)]$$

すなわち、 f_1 は第1区間における各変数が、 δ_v^*, e_v^*, b_v^* ($v=1, 2$), θ^* であるという条件のもとにおける、街路網全体のウェイトづけされたスループバンドの総和の最大値である。しかつて、この f_1 の最大値はとりまなおさず、求めるスループバンドの絶対最大値ということになり、それに対応する δ_v^*, e_v^*, b_v^* ($v=1, 2$), θ^* は第1区間における絶対最適政策となる。これはいま $\delta_v^{*1}, e_v^{*1}, b_v^{*1}, \theta^{*1}$ ($v=1, 2$), θ^{*1} とすると、つぎに第2区間における絶対最適政策 $\delta_v^{*2}, e_v^{*2}, b_v^{*2}$ ($v=1, 2$), θ^{*1}, θ^{*2} が、先に求めてあった f_2 のうちの $f_2(\delta_v^{*1}, e_v^{*1}, b_v^{*1}, \delta_v^{*2}, e_v^{*2}, b_v^{*2}, \theta^{*1})$ を見い出すことによって決定される。すなわち、まずこの f_2 に対応する θ^{*1}, θ^{*2} がそのまま θ^{*1}, θ^{*2} となるから、残りの変数はこれを利用して

$$\delta_v^{*2} = D_v^2(\delta_v^{*1}, e_v^{*1}, b_v^{*1}, \theta^{*1})$$

$$e_v^{*2} = E_v^2(\delta_v^{*1}, e_v^{*1}, b_v^{*1}, \theta^{*1})$$

$$b_v^{*2} = F_v^2(\delta_v^{*1}, e_v^{*1}, b_v^{*1}, \theta^{*1})$$

として決定される。

同様にして、 f_3, f_4, \dots, f_{N-1} をつぎつぎに利用することにより、ウェイトづけされた街路網全体にわたるスループバンドを最大にするような各区間の相対オフセットがすべて決定されるのである。

このようにして、路線系統の場合と同様に DP を用いることによって、街路網に対してもスループバンドの最大化を図り得ることがわかったが、かかる方法によって仮りに実際の街路網にオフセットが設定されたとしても、はたして制御効果

を發揮するか否かは、はなはだ疑問といえる。すなわち、面制御が必要とされるような街路網は、その大部分は都心部に位置しているから、車の右左折は当然ながら多いことが予想されるが、スル－バントの制御方策としての前提として、車はあくまでも直進のみであるという矛盾があるからである。

したがって、スル－バントを規準とする制御が有効な、低い交通需要に対しても、街路網を対象としたスル－バント最大方式によるオフセット設定は、あまり意味をもたないと考えられる。スル－バント最大方式による制御は、こうしたことからあくまでも交通の流れに明らかな方向性があり、かつその量自身も少ないような路線、あるいはそれが何本か組み合わせ合わせた形でのツリー状の路線系に対してのみ、有効な方法と解されるのである。なお、ツリーに対するスル－バント最大化の方法は、ここに述べた方法とそのまゝ適用すればよく、必要な操作はツリーに含まれない路線のスル－バントに対するウェイトをすべて0とおくことだけである。

4.3 動的計画法を用いた総損失最小化の手法

4.3.1 街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合⁵⁵⁾

路線を対象とした場合も、ツリーを対象とした場合も、街路区間相互の交通損失の独立性が成立するという前提のもとでのオフセットパターンの設定は極めて容易であったが、ループを含む街路網を対象とした場合には、先に述べたように、相対オフセットの実現可能条件を考慮しなければならないために、問題はそれほど単純ではなくなってくる。

したがって、ここでは前章図-3.5.2に示したような街路網を、やはり図-3.5.3のように N 個の区間に分割し、その

区間分割をDPの多段決定過程に対応させるという方法によって、この問題を解いてみることにする。

まず、記号については原則として前章で定義したものをそのまま用いるものとするが、新たにつぎのような関数を定義する。

$f_n(\theta^{n-1})$; 第 $(n-1)$ 区間の垂直方向リンクに対する相対オフセットが、 $\theta^{n-1} = (\theta^{1,n-1}, \theta^{2,n-1}, \dots, \theta^{M-1,n-1})$ であるという条件のもとで、第 n 区間から第 N 区間までの相対オフセットを最適化した場合に、それより $(N-n+1)$ 個の区間で発生する総損失
そうすると、まず第 N 区間における最適化は次式にしたがって遂行される。

$$f_N(\theta^{N-1}) = \min_{\theta^{N-1}, \theta^N} \left[\sum_{m=1}^M \left\{ g_1^{m,N-1}(\theta^{m,N-1}, \theta_1^{m,N-1}) + g_2^{m,N-1}(\theta^{m,N-1}, \theta_2^{m,N-1}) \right\} \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ g_1^{m,N-1}(\theta^{m,N-1}, \theta_1^{m,N-1}) + g_2^{m,N-1}(\theta^{m,N-1}, \theta_2^{m,N-1}) \right\} \right] \quad (4.3.1)$$

ここで、最小化の探索領域である θ^{N-1}, θ^N については、前章でも述べたが式(3.5.3)に示したような基本ループに沿う相対オフセットの実現条件を考慮する必要があることから、ループを構成しない M 個だけが独立であり、したがって、たとえば θ^{N-1} についてのみ探索を行えばよい。なぜならば、 θ^N については、次式によって自動的に与えられてしまうからである。

$$\theta^{m,N} = \theta^{m,N-1} + \theta^{m+1,N-1} - \theta^{m,N-1} \\ (m=1, 2, \dots, M-1)$$

このようなことから、以下では簡単のために、各区間におけ

る探索は水平方向リンクに対する相対オフセットについてのみ行なうことにする。

さて、式(4.3.1)より、 $\bar{\theta}^{N-1}$ のあらゆる組み合わせに対する $f_N(\bar{\theta}^{N-1})$ とそれに対応する $\bar{\theta}^{N-1}$ および $\bar{\theta}^N$ が求められる。これをいま $\bar{\theta}^{N-1}$ 、 $\bar{\theta}^N$ と表わすことにしておく。つまり、これらの相対オフセットは第 N 区間における条件付最適政策であって、詳細には f_N と同様に、 $\bar{\theta}^{N-1}(\bar{\theta}^{N-1})$ および $\bar{\theta}^N(\bar{\theta}^{N-1})$ と書けるわけである。

つぎに、上で求められた f_N を利用することによって、第 $(N-1)$ 区間における最適化の計算が以下のようにして行なわれる。

$$f_{N-1}(\bar{\theta}^{N-2}) = \min_{\bar{\theta}^{N-2}} \left[\sum_{m=1}^M \left\{ \bar{g}_1^{m,N-2}(\bar{\theta}^{N-2}, \bar{g}_1^{m,N-2}) + \bar{g}_2^{m,N-2}(\bar{\theta}^{N-2}, \bar{g}_2^{m,N-2}) \right\} + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ \bar{g}_1^{m,N-1}(\bar{\theta}^{N-1}, \bar{g}_1^{m,N-1}) + \bar{g}_2^{m,N-1}(\bar{\theta}^{N-1}, \bar{g}_2^{m,N-1}) \right\} + f_N(\bar{\theta}^{N-1}) \right]$$

上式の関係より、第 $(N-1)$ 区間に対応する f_{N-1} および $\bar{\theta}^{N-2}$ 、 $\bar{\theta}^{N-1}$ がすべて求められる。

一般に、第 n 区間の最適化の過程はつぎのような繰り返しとの関係にしたかう。

$$f_n(\bar{\theta}^{n-1}) = \min_{\bar{\theta}^{n-1}} \left[\sum_{m=1}^M \left\{ \bar{g}_1^{m,n-1}(\bar{\theta}^{n-1}, \bar{g}_1^{m,n-1}) + \bar{g}_2^{m,n-1}(\bar{\theta}^{n-1}, \bar{g}_2^{m,n-1}) \right\} + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ \bar{g}_1^{m,n}(\bar{\theta}^n, \bar{g}_1^{m,n}) + \bar{g}_2^{m,n}(\bar{\theta}^n, \bar{g}_2^{m,n}) \right\} + f_{n+1}(\bar{\theta}^n) \right] \quad (4.3.2)$$

式(4.3.2)の関係を利用することにより, $\bar{\theta}^{n-1}$ のあらゆる組み合わせに対する f_n とそれに対応する第 n 区間の条件付き最適相対オフセット $\bar{\theta}^n$, $\bar{\theta}^n$ がすべて計算される ($n=2, 3, \dots, N-1$).

そして最後に, f_1 と f_2 の間で次式が成立する。

$$f_1 = \min_{\bar{\theta}'} \left[\sum_{m=1}^{M-1} \{g_1^{m,1}(\bar{\theta}^{m,1}, \bar{\theta}_1^{m,1}) + g_2^{m,1}(\bar{\theta}^{m,1}, \bar{\theta}_2^{m,1})\} + f_2(\bar{\theta}') \right]$$

上式で, f_1 の計算はもはや条件付きで行なう必要がない。なぜならば, 第1区間より前の区間が存在しないからである。したがって, この段階で求められる $\bar{\theta}'$ は条件付き最適政策ではなく, 絶対最適政策である。いま, これを $\bar{\theta}^*$ と表わす。

このようにして, まず第1区間における最適オフセットが求まると, つぎに第2区間の最適相対オフセットが先に求めた f_2 を利用することにより, つぎのように決定される。すなわち, $f_2(\bar{\theta}')$ のうち $f_2(\bar{\theta}^*)$ を見いだし, それに対応する $\bar{\theta}'$ および $\bar{\theta}^*$ を最適相対オフセット $\bar{\theta}^1$, $\bar{\theta}^2$ とすればよいわけである。

まったく同様にして, このようにして求められた $\bar{\theta}^1$, $\bar{\theta}^2$ および f_3 を利用することにより第3区間の相対オフセットの最適値が求められるというように, 先とは逆に第 N 区間に向って進んでゆくことにより, すべての区間における最適相対オフセット $\bar{\theta}^{n-1}$, $\bar{\theta}^n$ ($n=2, 3, \dots, N$) が順次決定される。

このようにして, ループを含む街路網に対しても, その街路網を流れる交通量が与えられ, それが各街路区間で被る交通損失が当該区間に対応する相対オフセットの関数として与えられる場合には, その総損失最小の規準からみた最適オフセットパターンの決定は上述のような過程を経ることによ

って、理論的には可能であることがわかったが、街路網が大きく、分割区間数が多くなる場合には、各区間における交差点数すなわち最適過程における次元数が大であることを考えると、計算量はかなり膨大になると予想され、実際的な方法ではなくなる恐れもある。

したがって、かかる場合にはオフセットの探索格子間隔を大きくしたり、あるいは絶対的な最適オフセットパターンを求めることは諦め、対象街路網を適当な小領域（これをサブエリアとよぶことにする）に分け、そのおのおののサブエリアに対して上の方法を用いたりするというような便宜的手段を講ずる必要があるだろう。

4.3.2 隣接区間の相対オフセットの影響を考慮した場合

さて、つぎにある街路区間で発生する交通損失が、当該区間の相対オフセットのみならず、隣接区間の相対オフセットにも影響を受けると仮定した場合の街路網の総損失最小からみたオフセットパターン決定法について検討してみる。このような前提は、前章でも述べたように、交通量が多い場合には設ける必要のないものであるし、また、実際にその前提が成立すると考えられる交通量に対しても、交通損失関数形を与えることが極めて困難であると予想されることから、現実の制御に用いられることは少ないと考えられるが、将来に起り得る特定のケースについては利用に供される可能性がないとは言えないので、以下にその理論的骨子を記すものである。

この問題は、前章の3.5.2で述べた問題に対応しており、総損失最小のオフセットパターンを決定する方法も、最大ツリーの中の損失を最小にするDP法をそのまま適用すればよい。すなわち、最大ツリーの最適化の過程は、そのツリーに

含まれるリンクには1を，含まれないリンクには0を対応させた街路網全体の損失最小化の問題に帰着するので，ここではすべてのリンクに対する変数 l を1として，その方法を用いればよいのである。

すなわち，第 n 区間の最適化に対する繰り返しとの関係のみを記すと

$$\begin{aligned} f_n(\theta^{n-2}, \theta^{n-1}) = \min_{\theta^{n-1}} & \left[\sum_{m=1}^M \left\{ g_1^{m,n-1}(\theta^{m,n-2}, \theta^{m,n-1}, \theta^{m-1,n-1}, \theta^{m,n-1}, g_1^{m,n-1}) \right. \right. \\ & + g_2^{m,n-1}(\theta^{m,n-1}, \theta^{m,n-1}, \theta^{m-1,n-1}, \theta^{m,n-1}, g_2^{m,n-1}) \left. \right\} + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ g_1^{m,n} \right. \\ & \left. \theta^{m-1,n}, \theta^{m,n}, \theta^{m-1,n-1}, \theta^{m,n}, g_1^{m,n} \right\} + g_2^{m,n}(\theta^{m-1,n}, \theta^{m,n}, \\ & \left. \theta^{m+1,n-1}, \theta^{m+1,n}, g_2^{m,n}) \right\} + f_{n+1}(\theta^{n-1}, \theta^n) \end{aligned}$$

となる。

この問題では，4.3.1の場合に比べて各区間すなわち最適化の各段階における次元数が2倍近くなるので，街路網が小さくても計算量はかなり多くなる。

4.3.3 任意区間の相対オフセットの影響を考慮した場合

つぎに，ある1つのリンクで発生する損失が，対象街路網に属する任意の街路区間に対応する相対オフセットに影響を受ける場合におけるオフセットパターンの決定方法について検討してみよう。この特殊な場合としては，すべての区間の相対オフセットに影響を受けるというケースが考えられよう。

まず，目的関数は一般的に $F(\theta)$ と表わすことができる。

ここに， θ は対象街路網中に含まれる各リンクに対応する相対オフセットのすべてから成るベクトルであるとする。この

とき, $F(\theta)$ がつぎのように, いくつかの関数に分解される場合, またはそれに準ずる場合を考えてみよう。すなわち

$$F(\theta) = F_1(\theta_1, \theta_2) + F_2(\theta_2, \theta_3) + \cdots + F_{k-1}(\theta_{k-1}, \theta_k) \quad (4.3.3)$$

のように表わされる場合である。ここで, $F_1 \sim F_{k-1}$ は任意関数, また θ_i ($i=1, 2, \dots, k$) はお互いに共通要素をもたない θ の部分ベクトルで, 一般性を失なうことなく

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

と書けるものとする。

$F(\theta)$ が式(4.3.3)のように表わされる場合は, ここで取扱かう問題に関しては特別な場合であり, 先に述べた 4.3.1 または 4.3.2 はこれに属する。

このような場合の $F(\theta)$ の最小化は, いま $f_i(\theta_i)$ なる関数を, θ_i を一組の固定したという条件下で $\theta_{i+1} \sim \theta_k$ を最適化したときの $\sum_{j=i}^{k-1} F_j(\theta_j, \theta_{j+1})$ の値と定義したとき, 以下のようにして行なえばよい。

まず

$$f_{k-1}(\theta_{k-1}) = \min_{\theta_k} [F_{k-1}(\theta_{k-1}, \theta_k)]$$

なる関係式より, θ_{k-1} のあらゆる組み合わせに対する f_{k-1} および $\theta_k (= \hat{\theta}_k)$ を求める。

つぎに, この f_{k-1} を利用して $k-2, k-3, \dots, 1$ の順に, 次式に示すような繰り返えしの関係を用いて, つぎつぎに f_i を計算してゆく。

すなわち

$$f_i(\theta_i) = \min_{\theta_{i+1}} [F_i(\theta_i, \theta_{i+1}) + f_{i+1}(\theta_{i+1})]$$

上式より, θ_i に対する f_i と $\theta_{i+1} (= \dot{\theta}_{i+1})$ がすべて計算される。

ところが, 最後に求められる $f_1(\theta_1)$ は定義によれば θ_1 を一組固定したという条件下における $F(\theta)$ の最小値である。

したがって, この $f_1(\theta_1)$ を最小にする θ_1 を見つければ, それはとりもなおさず絶対最適オフセット ($= \dot{\theta}_1^*$) となる。このようにして, まず θ_1 の最適値が求められると, $\dot{\theta}_2$ (θ_2 の最適値) は $f_1(\dot{\theta}_1)$ に対応する $\dot{\theta}_2$ として求められるというように, 先に計算してあった f_2, f_3, \dots, f_{k-1} を利用することにより, すべての θ_i の最適値 $\dot{\theta}_i$ が決定される。したがって, $F(\theta)$ が式 (4.3.3) のように表わされる場合の最適オフセットパターンが得られたことになる。

このようにして, $F(\theta)$ が式 (4.3.3) のように表わされる場合には, たとえある街路区間で発生する交通損失が, 対象街路網のすべての相対オフセットの影響を受けるとしても, その最適オフセットパターンを求め得ることがわかったが, 上述したことはあくまでも原理的な方法論の展開であって, θ_i ($i=1, 2, \dots, k$) の次元数が大きい場合には, 計算量が膨大になることは避けられない。

ある街路区間で発生する交通損失が数交差点以遠のオフセットにも影響されるということは, 理論的には考え得るが, 街路区間途中での車の発生吸収, タフシーあるいはバスの発停車, さらにそれらが原因となる走行速度の乱れ等の種々の攪乱要因を考慮すると, このような前提はむしろ非現実的になる。したがって, ここで述べた方法は仮りに $F(\theta)$ が式 (4.3.3) のように表わされる場合においても, 実際問題に適用する価値は薄いと考えられる。

4.3.4 一般的问题への適用

以上、3つの場合について、ループを含む街路網の総損失最小化規準によるオフセットパターンの決定方法を検討したが、これらのうち第2章での検討結果も考慮すると、4.3.1の場合が最も实际的であると考えられる。すなわち、面制御が必要とされるような街路網においては、すでに交通需要はどの街路区間でもかなり多いと考えられることから、街路区間相互の交通損失の独立性が成立しやすいわけであり、またオフセットパターン決定のための計算が他の場合に比べて容易であると言えるからである。

したがって、ここでは4.3.1に示した方法の、街路網を対象とした種々の制御パターン決定問題への適用方法あるいは拡張方法について述べることにする。

(1) 重要交差点あるいは重要区間がある場合

対象街路網の中に、大型車の集中、右左折車、横断歩行者、交差点構造の欠陥などの理由によって、渋滞が生じやすい交差点、すなわちここでのいう重要交差点があつたり、あるいは車の発生吸収、タクシー、バスの発車停車が多く、車の円滑な流れが阻害されやすい区間、交差点間距離が短い区間などの重要区間があつたりする場合が少なくない。

かかる場合、重要交差点の隣接交差点との関連におけるオフセット設定あるいは重要区間の相対オフセット設定は微妙であり、最適オフセットが存在するとした場合、そのオフセット以外のオフセットを設定することは、混乱を招く大きな危険性をはらんでいる。しかるに、街路網の全体的観点からこれらの区間に設定される相対オフセットは、必ずしもその区間独自の最適相対オフセットに一致するという保証はない。

したがって、このような場合には、まず問題となる区間の

相対オフセットを優先的に与えてしまい、その条件のもとに 4.3.1 の方法を使えばよい。すなわち、いま交差点 $(m, n-1)$ と交差点 (m, n) にはさまれる区間が問題となる区間としたとき、式 (4.3.2) に対応する繰り返えしの関係式として

$$f_n(\theta^{n-1}) = \min_{\hat{\theta}^{n-1}} [\quad] \quad (4.3.4)$$

を考えればよい。ここに、

$$\hat{\theta}^{n-1} = (\theta^{1,n-1}, \theta^{2,n-1}, \dots, \theta^{m-1,n-1}, \theta^{m,n-1}, \dots, \theta^{M,n-1})$$

であり、 $\hat{\theta}^{n-1}$ に比べて要素が 1 つ少ないベクトルである。このことはすなわち、第 n 区間の最適化に関する次元数が減少することであるから、計算量は 4.3.1 の場合に比較して少なくなることになる。

したがって、ある定められた値にオフセットを設定しなくてはならないような区間が、多くあればある程、DP 法では計算は容易になるだけであって、4.3.1 の方法の適用上における問題点はまったく発生しないことがわかる。

上では、 $\theta^{m,n-1}$ がただ 1 つの値に固定されてしまう場合を考えたが、上記と同様の理由から $\theta^{m,n-1}$ に上下限が与えられる場合には、式 (4.3.4) に代わる式として

$$f_n(\theta^{n-1}) = \min_{\theta_L \leq \theta^{m,n-1} \leq \theta_U} [\quad] \quad (4.3.5)$$

を考えればよく、この場合にも $\theta^{m,n-1}$ の探索領域がせがめられることから計算はかえって容易となる（ただし、上式の θ_U , θ_L はそれぞれ $\theta^{m,n-1}$ の上限値および下限値である）。この種の問題の代表例は、交差点間距離が短かく、ある範囲のオフセットに対しては待ち行列の後尾が上流側交差点にまで伸

長する場合で、かかる場合には、当該区間の相対オフセットの探索領域を待ち行列の後尾が上流側交差点に及ばないような相対オフセットに限定する必要があるのである。

ところで、4.3.1 で述べた方法をこうした問題に適用する方法の骨子は、関連する相対オフセットの探索領域をせばめることにあるが、4.3.1 の方法を機械的に利用できる別の方法も考えられる。すなわち、設定されると不都合が生ずるようなオフセットに対する交通損失の値を作為的に非常に大きい値にしておくのである。こうすることによって、総損失を最小にする過程の中で、不都合なオフセットはおのずから選択から排除されることになる。ただし、この場合には計算量は4.3.1 と変わらないという結果になる。

(2) 主要交差点間に小交差点がある場合

普通、われわれが目にする街路では、主要交差点と主要交差点の間に、小交差点がある場合が多い。かかる場合の4.3.1 の方法の適用法としては、最初の対象街路網として小交差点、小街路を含むものを考えれば問題はないが、その場合には計算量が不必要に多くなるという欠点が生じてくる。

したがって、他の有効な方法について考えなければならないが、まず一方通行の場合には上流側主要交差点から、下流側主要交差点の1つ上流の小交差点まで、局所的な路線系統オフセットを設定するのである。小交差点におけるスプリットは主要街路の交通流に対してより長い青信号時間が表示されるように設定されることを考え合わせると、このような局所的な路線系統制御によって、上流側主要交差点を流出した交通は途中の小交差点ではほとんど交通損失を被むることなく下流側主要交差点に到達しうることになり、したがって、小

交差点を無視した形での 4.3.1 の方法はそのまま適用できることになる。なお、局所的な路線系統オフセットの設定は、状況に応じて前章に示した種々の方法を駆使して行なえばよく、それも主要交差点のみを対象とした最適オフセットパターンが決定された後に、その部分だけ独立して行なえばよいので、方法論的に極めて容易である。なお、一方通行の場合の 4.3.1 の方法の適用は、流れのない方向に対する交通量を 0 とおくことによって可能であることを付言しておく。

つぎに、二方通行の場合の処理は、小交差点の主要流方向に対する青信号時間を極めて長く設定し、上下流の主要交差点のオフセットが既に与えられているという条件のもとにその街路区間全体にわたって路線系統オフセットを与えるという方法をとるようになる。このことによって主要交差点を流出した交通が、途中の小交差点で交通損失を被むることは少なくなり、したがって、4.3.1 の方法がそのまま適用できることになる。なお、対象路線の両端交差点におけるオフセットが与えられているという条件下における損失最小のオフセット設定は、DPを用いることによって容易に行なえる。

また、より望ましい方法としては、小交差点も含んだ形で対象街路区間の交通損失関数を始めから与えておくという方法があるが、この場合には前章で検討したような最大値最小値を1つつつ有する損失関数は必ずしも得られない。しかしながら、つぎに述べるように、このことは 4.3.1 の方法を使う上でまったく問題はない。

(3) 交通損失関数が不連続の場合

4.3.1 における理論展開では、あたかも損失関数 $g(\theta, g)$

が連続かつ既知関数でなければならぬような印象を与えるが実際には不連続関数であっても，また極端な場合としてまったく関数として評価できない場合であっても，まったくさしつかえないのである。

すなわち，まず不連続関数の場合について考えてみると，いま J 個の不連続点があるとした場合には $g(\theta, \varphi)$ は一般的に

$$g(\theta, \varphi) = \begin{array}{cc} g^1(\theta, \varphi) & 0 \leq \theta \leq \theta^1 \\ g^2(\theta, \varphi) & \theta^1 \leq \theta < \theta^2 \\ \vdots & \vdots \\ g^J(\theta, \varphi) & \theta^{J-1} \leq \theta < C \end{array}$$

ただし， θ^i ; 関数が不連続となる相対オフセット値

$g^i(\theta, \varphi)$; 各領域の関数

のように与えられる。したがって，この関係を計算プログラムの中に組み込んでおいて，該当する街路区間が含まれる区間の最適化の過程において，その街路区間の損失関数を，探索する θ の値に応じて適宜変えつつ，計算を実行すればよいわけである。このことによって計算量は若干増加するであろうが，各区間の次元数は元のままだから，それ程問題ではない。このような場合の一例として，前章で検討した停止回数関数の関数として図-2.4.18のような曲線を用いる場合が考えられるが，実際の計算例は次章に譲ることにする。

つぎに，部分的にしろまったく関数が使用できないような場合，たとえば θ の変化に対し交通損失が図-4.3.1 のように，まったくでたために変化している場合についてであるが，このような場合には $g(\theta, \varphi)$ をもはや関数としてとらえずに，

θ と g の一组に対して与えられる数値と解釈して計算を行なえばよいのである。すなわち、実験あるいはシミュレーションによって、 θ の探索間隔に対応して交通損失 $g(\theta, g)$ が図-4.3.1のように与えられるならば、そのおのおのの値を θ の値との関連でプログラム中のデーターとして記憶しておき、最適化の計算過程でそれらの値を逐一ひき出す方法を講ずればよい。このためには、 $g(\theta, g)$ を記憶するためのメモリーが多く必要となるが、そのかわり関数形を用いる場合のように $g(\theta, g)$ をそのつと計算しななければならないことがなくなり、最適化の計算量は大幅に減少することが期待できる。

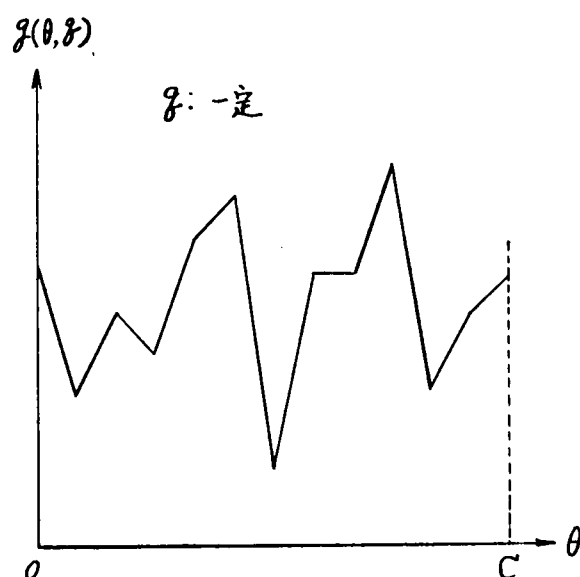


図-4.3.1 $g(\theta, g)$ が関数形を構成しない例

(4) 路線にウェイトをつける場合

対象街路網の中に、とくに疎通能力を高めるように制御したい路線あるいは逆に他の路線のために戦略的に犠牲にしたい路線が何本かある場合がある。かかる場合には、該当路線に含まれる街路区間の損失関数 $g(\theta, g)$ に適当な重み係数 w を乗じて、 $w \cdot g(\theta, g)$ を新たな損失関数と考え、この状態で4.3.1の方法をそのまま適用すればよい。そうすれば、疎通能力を高めたい路線におのずから有利なオフセット設定が行なわれるであろうし、逆に犠牲にしたい路線には不利なオフセットが設定されることになる。

また、(1)と同様にそのような路線のオフセットを予め設定してしまっておいたり、または戦略的に望ましいオフセット設定が可能な範囲において、それらのオフセットに制約条件を付けておくという方法もある。この場合には(1)で述べた理由と同じ理由によって、計算量は減少するはずである。

(5) 路線系統制御の効果を生かした全体的制御

(4)の特別な場合とも考えられるが、何らかの判断によって、ある路線には、街路網の全体的バランスに制限されることなく、優先的に路線系統オフセットを設定したい場合がある。たとえば、該当路線が一方通行で、かつ道路条件が極めて優れているとき、その路線の系統オフセットを維持することが、街路網全体の制御効率を発揮する上で不可欠の要件であると判断される場合などである。

このようなときには、(1)と同様にして、対象路線を構成する街路区間の相対オフセットを予め与えておいて(その与え方は、前章で述べた方法を駆使すればよい)、その条件下で4.3.1の方法による最適化を行なえばよいのである。その場合、すでに与えられている街路区間の相対オフセットについては、一切の探索を要しないので、計算量が減少することは言うまでもない。

この特別の場合として、前章図-3.5.2に示した対象街路網で、垂直方向の路線すべてに路線系統制御を行なうという場合が考えられる。このような場合にはループに沿う相対オフセットの実現条件式より、たとえば第 n 区間における一番上の水平方向街路区間に対応する相対オフセット θ^{n-1} が与えられると、同一区間における他のすべての相対オフセットがそれに従って決定されてしまう。すなわち、

まず $k_{\theta^{2,n-1}}$ は

$$k_{\theta^{2,n-1}} = k_{\theta^{1,n-1}} + v_{\theta^{1,n}} - v_{\theta^{1,n-1}}$$

として, $k_{\theta^{1,n-1}}$ と与えらるる垂直方向の街路区間の相対オフセットによって定められる。

つまり, $k_{\theta^{3,n-1}}$ は

$$\begin{aligned} k_{\theta^{3,n-1}} &= k_{\theta^{2,n-1}} + v_{\theta^{2,n}} - v_{\theta^{2,n-1}} \\ &= (k_{\theta^{1,n-1}} + v_{\theta^{1,n}} - v_{\theta^{1,n-1}}) + v_{\theta^{2,n}} - v_{\theta^{2,n-1}} \\ &= k_{\theta^{1,n-1}} + (v_{\theta^{1,n}} - v_{\theta^{1,n-1}}) + (v_{\theta^{2,n}} - v_{\theta^{2,n-1}}) \end{aligned}$$

として, やはり $k_{\theta^{1,n-1}}$ と垂直方向の相対オフセットによって表わされる。

同様にして, 一般に $k_{\theta^{m,n-1}}$ は

$$k_{\theta^{m,n-1}} = k_{\theta^{1,n-1}} + \sum_{i=1}^{m-1} (v_{\theta^{i,n}} - v_{\theta^{i,n-1}}) \quad (4.3.5)$$

となる。

さらに, 各区間の水平方向の相対オフセットには何らの関係もない。したがって, このような場合における街路網全体の総損失の最小化は各区間ごとに独立に, かつ一番上の水平方向街路区間に対応する相対オフセットのみについて行なえばよいことがわかる。このことを式で表わすと

$$\begin{aligned} \min_{k_{\theta^{1,n-1}}} \left[\sum_{m=1}^M \left\{ k_{g_1^{m,n-1}} \left(k_{\theta^{1,n-1}} + \sum_{i=1}^{m-1} (v_{\theta^{i,n}} - v_{\theta^{i,n-1}}), g_1^{m,n-1} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + k_{g_2^{m,n-1}} \left(k_{\theta^{1,n-1}} + \sum_{i=1}^{m-1} (v_{\theta^{i,n}} - v_{\theta^{i,n-1}}), g_2^{m,n-1} \right) \right\} \right] \\ (n=2, 3, \dots, N) \end{aligned}$$

となり、上式を満たす θ^{n+1} を求めることによって、街路網のオフセットパターンは完全に決定される。

このように、垂直方向路線すべてに路線系統オフセットを設定するという条件のもとにおける、街路網の総損失最小化規準によるオフセットパターン決定の問題は極めて容易であることがわかる。

(6) 決定変数としての制御パラメーターの中にスプリットを含めた場合

いままでに述べてきた議論は、すべて周期、スプリットが与えられたという前提のもとにおけるオフセットパターン決定の問題であるが、周期は別として、スプリットをも決定変数としたい場合には、問題はどのようにして定式化できるであろうか。

スプリット設定を全体的観点から行なう必要性が生ずるのは、隣接交差点のスプリットが相互に影響を及ぼす場合で、たとえば $g_i^{m,n}$ が被むる交通損失が $\theta^{m,n}$ のように表わされる場合である。

$g_i^{m,n}(\theta^{m,n}, s^{m,n}, s^{m,n+1}, g_i^{m,n})$; 交差点 (m, n) におけるスプリットが $s^{m,n}$ 、交差点 $(m, n+1)$ におけるスプリットが $s^{m,n+1}$ で、かつこれらの交差点の相対オフセットが $\theta^{m,n}$ であるとき、 $g_i^{m,n}$ が被むる損失(他の交通についても同様)

このような場合の最適化の過程は、式(4.3.2)にかわってつぎのような繰り返えしの関係に従えばよい。

$$f_n(s^{n+1}, \theta^{n+1}) = \min_{\theta^{n+1}, s^{n+1}} \left[\sum_{m=1}^M \left\{ g_i^{m,n+1}(\theta^{m,n+1}, s^{m,n+1}, s^{m,n}, g_i^{m,n+1}) \right\} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + g_2^{m,n-1}(\theta^{m,n-1}, s^{m,n-1}, s^{m,n}, g_2^{m,n-1}) \} + \sum_{m=1}^{M-1} \{ g_1^{m,n}(\theta^{m,n}, s^{m,n}, \\
& s^{m+1,n}, g_1^{m,n}) + g_2^{m,n}(\theta^{m,n}, s^{m,n}, s^{m+1,n}, g_2^{m,n}) \} + \\
& f_{n+1}(s^n, \theta^n)]
\end{aligned}$$

ここに, $s^n = (s^{1,n}, s^{2,n}, \dots, s^{M,n})$

, $f_n(s^n, \theta^n)$; $f_n(\theta^n)$ の定義に準ずる。

上式は式(4.3.2)に比べて根本的相異はなく, 単に各段階における最適化の次元数が増えているにすぎない。したがって, 計算量は相当膨大なものとなろう。

問題は, 上記損失関数がいかに現実に即した形で求められるかであり, 簡単な方法としては従来からよく用いられている, 交差点からの流出車群波形を矩形と仮定するなどの方法があるが, これにしても精巧なシミュレーションあるいは実際の街路における調査・実験による裏づけが必要である。

(7) 路線系統制御, ツリー形成制御およびループを基盤とする制御が混在する場合

図-4.3.2 に示したように, 1つの街路網を各部分ごとに, 路線系統制御, ツリー形成制御あるいはループを基盤とする制御というように, いままでに述べてきた各種制御方式を混在させた形で制御しようとする場合である。

まず, 最も簡単な方法としては, ループを基盤とした部分に, 局部的に4.3.1の方法を適用してそこにおけるオフセットパターンを決定してしまい, 残るツリー, あるいは路線の部分におけるオフセットパターンは, それぞれ独自に前章で述べたような方法に従って決定するという方法が考えられる。

この方法は最も計算時間のかからない有効な方法と思われる。

これに対して、計算量は多くなるが 4.3.1 の方法をそのまま機械的に適用できる方法として、系統制御を行わない街路区間の交通損失関数 $f(\theta, g)$ をすべて θ の値について 0 とおく方法が考えられる。これによって、その街路区間は最適化の計算過程で自動的に制御対象からはずされることになり、したがって、系統制御の対象となる街路区間のオフセットは優先的に有利なパターンを与えられるように決定される。

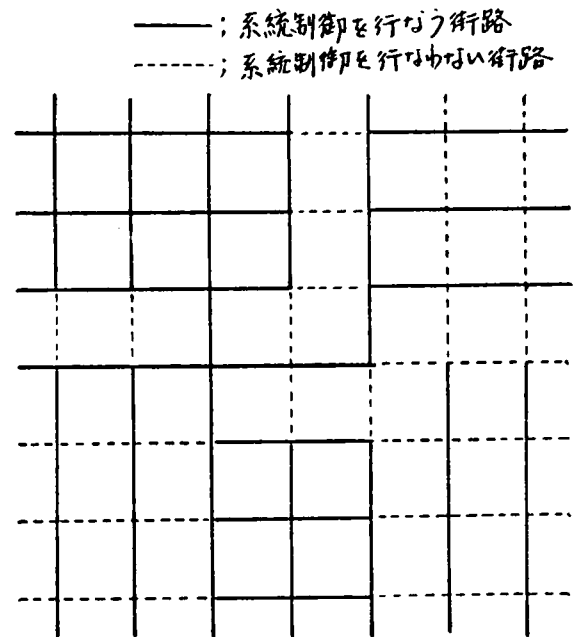


図-4.3.2 各種制御方式が混在する網

(8) 街路網が任意の形状をしている場合

対象街路網が秩序正しい格子状をしていない場合においても、区間分割を適当に行なうことにより、4.3.1 と同様の方法によって最適オフセットパターンの決定を行なうことができる。

すなわち、たとえば図-4.3.3 に示したような形状の街路網に対しては、図中一点鎖線で示したような6つの区間に分けるという分割方法が考えられよう。この例は、同一区間内にループが含まれないように配慮した分割の一例であって、その他にも種々の分割方法が考えられるであろう。

このように、対象街路網が分割されてしまえば、基本的に格子状街路網と同様の考え方に従って定式化を行なえばよい。

なお、区間分割の方法によつて計算量が異なるという問題があり、これについてはさらに研究を進める必要がある。

(9) 制御効率からみた交差点立体化の問題

対象街路網中のどの交差点を立体化すれば全体としての制御効率が最も向上するかという問題であるが、このためには、交差点を1つ1つ立体化したものとして、そのつど4.3.1の方法によつて最適化を行ない、それに対応する総損失を求めて、最も小さい総損失を与える場合に対応する交差点立体化をもつて、求める解とすればよい。立体化すべき交差点が2つ以上の場合についても同様である。

以上、4.3.1の方法が種々の問題に適用されることを示したが、上述の9つの場合がお互いに複合している問題についても、同様にしてこの方法が適用できることは言うまでもないであろう。

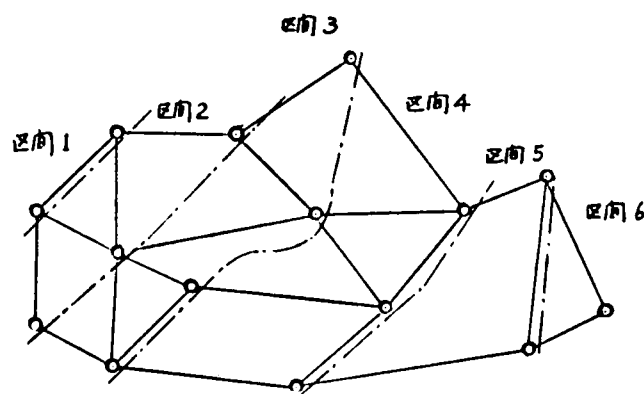


図-4.3.3 複雑な街路網の区間分割例

4.4 離散型最大原理を用いた総損失最小化の手法⁵⁶⁾

4.3.1で検討した問題と同じ問題を、ここでは離散型最大原理によつて解く方法を示すことにする。

対象街路網および記号については、原則としていままでと同じものを使うが、ここでは交通損失をとくに各交差点の絶対オフセットで表わすものとし、以下のように定義する。

$g_v^{m,n}(\xi_v^{m,n}, \xi_v^{m,n+1}, g_v^{m,n})$; 交差点 (m,n) の絶対オフセット

トが $\xi^{m,n}$, 交差点 $(m, n+1)$ の絶対オフセットが $\xi^{m,n+1}$ であるとき, ${}^v g_v^{m,n}$ が被むる損失 ($v=1, 2$; $m=1, 2, \dots, M$; $n=1, 2, \dots, N-1$)

${}^v g_v^{m,n}(\xi^{m,n}, \xi^{m+1,n}, {}^v g_v^{m,n})$; 交差点 (m, n) の絶対オフセットが $\xi^{m,n}$, 交差点 $(m+1, n)$ の絶対オフセットが $\xi^{m+1,n}$ であるとき, ${}^v g_v^{m,n}$ が被むる損失 ($v=1, 2$; $m=1, 2, \dots, M-1$; $n=1, 2, \dots, N$)

先に相対オフセットによって定義されていた交通損失関数が, 絶対オフセットの関数として上のように表わされることは, 相対オフセットと絶対オフセットの間に

$${}^h \theta^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m,n+1}$$

$${}^v \theta^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}$$

なる関係があったことを想起すれば, 容易に理解できる。

さて, DP の場合と同じく対象街路網の区間分割を, 多段決定過程の段階に対応させて考える。そうすると, ここで取り扱う問題は, 状態変数 $g(\xi, \xi', g)$ と操作変数 g から成る N 個の段階を経ることによって, 街路網の総損失を最小にするという問題になる。

しかしながら, ここで示した問題そのまゝの形では離散型最大原理の適用が不可能である。そこで状態変数および操作変数を付加修正することによって, 標準的な問題に変換する必要がある。そのために, まず第 n 区間に対応する状態変数として, つぎのような変数 x^n を導入する。

$$x_1^n = x_1^{n-1} + \sum_{m=1}^M \{ {}^h g_1^{m,n-1}(\xi^{m,n-1}, \xi^{m,n}, {}^h g_1^{m,n-1}) + {}^h g_2^{m,n-1}(\xi^{m,n-1}, \xi^{m,n}, {}^h g_2^{m,n-1}) \}$$

$$+ \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ v_{g_1}^{m,n}(\xi^{m,n}, \xi^{m+1,n}, v_{g_1}^{m,n}) + v_{g_2}^{m,n}(\xi^{m,n}, \xi^{m+1,n}, v_{g_2}^{m,n}) \right\} \\ (n = 2, 3, \dots, N) \quad (4.4.1)$$

ここに、 x'_1 は

$$x'_1 = \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ v_{g_1}^{m,1}(\xi^{m,1}, \xi^{m+1,1}, v_{g_1}^{m,1}) + v_{g_2}^{m,1}(\xi^{m,1}, \xi^{m+1,1}, v_{g_2}^{m,1}) \right\} \quad (4.4.2)$$

のように表わされる第1区間における交通損失である。したがって、式(4.4.1)で与えられる x^n は第1区間から第 n 区間までの交通損失の累計を意味することになる。このことから、街路網全体での総損失すなわちこの問題の目的関数は x^N となり、最後の段階をでてゆく状態変数で表わされることになった。

ここで、さらに

$$y^{m,n} = \xi^{m,n} \quad (4.4.3)$$

$$\varphi^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m,n-1} \quad (4.4.4)$$

とおくと、式(4.4.1)で与えられる状態変数 x^n はつぎのように書きかえられる。

$$x_1^n = x_1^{n-1} + \sum_{m=1}^M \left\{ v_{g_1}^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, v_{g_1}^{m,n-1}) + v_{g_2}^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, v_{g_2}^{m,n-1}) \right\} + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ v_{g_1}^{m,n}(\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, v_{g_1}^{m,n}) + v_{g_2}^{m,n}(\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, v_{g_2}^{m,n}) \right\} \quad (4.4.5)$$

上式において、 $y^{m,n-1}$ を状態変数、 $\varphi^{m,n}$ を操作変数と解釈

すれば、これはそのまま標準形の状態方程式となる。

ところで、 $y^{m,n}$ に関する状態方程式は式(4.4.3)および式(4.4.4)より

$$y^{m,n} = \varphi^{m,n} + y^{m,n-1} \quad (4.4.6)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; n=2, 3, \dots, N)$$

となり、これも標準形であることがわかる。

このようにして、ここに取り扱う問題は、式(4.4.5)および式(4.4.6)の状態方程式のもとに、最後の段階の状態変数 x_1^n で表わされる目的関数を最小にするような、各段階における操作変数 $\varphi^{m,n}$ を決定するという問題に変換された。これが離散型最大原理で一般的に与えられている問題で、具体的解法は以下のようなになる。

まず、次式で定義されるような第 n 区間に対応するハミルトニアンを導入する。

$$H^n = Z_1^n x_1^n + \sum_{m=1}^M Z_{m+1}^n y^{m,n} \quad (4.4.7)$$

$$(n=2, 3, \dots, N)$$

上式に含まれる $Z_i^n (i=1, 2, \dots, M+1)$ は補助変数とよばれるもので、これが満足すべき条件は以下に示すとおりである。

$$Z_1^n = \frac{\partial H^n}{\partial x_1^{n-1}} \quad (4.4.8)$$

$$(n=2, 3, \dots, N)$$

$$Z_{m+1}^n = \frac{\partial H^n}{\partial y^{m,n-1}} \quad (4.4.9)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; n=2, 3, \dots, N)$$

ただし、式(4.4.8)および式(4.4.9)における偏微分の記号は、与えられた問題によつては差分を意味するものとしてもよいものとする。

式(4.4.7)で与えられるハミルトニアンに、式(4.4.5)および式(4.4.6)の関係を代入すると

$$\begin{aligned}
 H^n = Z_1^n & \left[X^{n-1} + \sum_{m=1}^M \left\{ \dot{g}_1^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \dot{g}_1^{m,n-1}) + \dot{g}_2^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \dot{g}_2^{m,n-1}) \right\} \right. \\
 & + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ \dot{g}_1^{m,n}(\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, \dot{g}_1^{m,n}) + \dot{g}_2^{m,n}(\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, \dot{g}_2^{m,n}) \right\} \\
 & \left. + \sum_{m=1}^M Z_{m+1}^n (\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}) \right] \quad (4.4.10)
 \end{aligned}$$

と得る。式(4.4.10)を考慮すると式(4.4.8)および式(4.4.9)からつぎのような関係式が得られる。

$$Z_1^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial X^{n-1}} = Z_1^n \quad (4.4.11)$$

$$\begin{aligned}
 Z_{m+1}^{n-1} = \frac{\partial H^n}{\partial y^{m,n-1}} = & Z_{m+1}^n + Z_1^n \left(\sum_{\nu=1}^2 \left[\left\{ \dot{g}_\nu^{m,n-1}(y^{m,n-1}+1, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}+1, \dot{g}_\nu^{m,n-1}) - \dot{g}_\nu^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \dot{g}_\nu^{m,n-1}) \right\} \right. \right. \\
 & + \left\{ \dot{g}_\nu^{m,n}(y^{m,n-1}+1, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, \dot{g}_\nu^{m,n}) - \dot{g}_\nu^{m,n}(y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, \dot{g}_\nu^{m,n}) \right\} \\
 & \left. + \left\{ \dot{g}_\nu^{m+1,n}(y^{m+1,n-1}+1, \varphi^{m+2,n} + y^{m+2,n-1}, \dot{g}_\nu^{m+1,n}) - \dot{g}_\nu^{m+1,n}(y^{m+1,n-1}, \varphi^{m+2,n} + y^{m+2,n-1}, \dot{g}_\nu^{m+1,n}) \right\} \right] \right) \\
 & \left. + \left\{ \dot{g}_\nu^{m+1,n}(y^{m+1,n-1}, \varphi^{m+2,n} + y^{m+2,n-1}, \dot{g}_\nu^{m+1,n}) - \dot{g}_\nu^{m+1,n}(y^{m+1,n-1}, \varphi^{m+2,n} + y^{m+2,n-1}, \dot{g}_\nu^{m+1,n}) \right\} \right] \right) \quad (4.4.12)
 \end{aligned}$$

一方, 補助変数 Z_1^n の終端条件は, 目的関数 F が x_1^N であり, それは

$$F = 1 \cdot x_1^N + 0 \cdot y_1^N + 0 \cdot y_2^N + \dots + 0 \cdot y^{M,N}$$

のように表わされるので,

$$Z_1^N = 1 \quad (4.4.13)$$

$$Z_{m+1}^N = 0 \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (4.4.14)$$

となる。式(4.4.11)および式(4.4.13)より, 補助変数 Z_1^n はつぎのように一義的に決定されてしまう。

$$Z_1^n = 1 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (4.4.15)$$

式(4.4.15)を考慮すると, 式(4.4.10)で与えられるハミルトニアンはつぎのようになる。

$$\begin{aligned} H^n = & x_1^{n-1} + \sum_{m=1}^M \left\{ k_{f_1}^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, k_{f_1}^{m,n-1}) + k_{f_2}^{m,n-1}(y^{m,n-1}, \right. \\ & \left. \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, k_{f_2}^{m,n-1}) \right\} + \sum_{m=1}^{M-1} \left\{ v_{f_1}^{m,n}(\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + \right. \\ & \left. y^{m+1,n-1}, v_{f_1}^{m,n}) + v_{f_2}^{m,n}(\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, \varphi^{m+1,n} + y^{m+1,n-1}, v_{f_2}^{m,n}) \right\} \\ & + \sum_{m=1}^M Z_{m+1}^n (\varphi^{m,n} + y^{m,n-1}) \quad (4.4.16) \\ & (n = 2, 3, \dots, N) \end{aligned}$$

各区間における最適操作変数 $\varphi^{m,n}$ は, その変域で, 式(4.4.16)によって与えられる H^n を最小ならしめる値を見つけることによって決定される。ここに, $\varphi^{m,n}$ の変域は式(4.4.12)

および式(4.4.16)より, $y^{m,n} = \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}$ となっている部分と $y^{m,n} = \varphi^{m,n} + y^{m,n-1} + 1$ となっている部分があるから, まず最初の関係から $y^{m,n-1} = y^{m,n} - \varphi^{m,n}$ となり, さらに $0 \leq y^{m,n-1} \leq C$ なる関係があることを考慮すると $y^{m,n} - C \leq \varphi^{m,n} \leq y^{m,n}$ が導かれ, 同様にして第2番目の関係から, $y^{m,n} - C - 1 \leq \varphi^{m,n} \leq y^{m,n} - 1$ が導かれるので, これら両変域の共通部分を考えると, けっきょく, $y^{m,n} - C \leq \varphi^{m,n} \leq y^{m,n} - 1$ となる。

さて, この変域における H^n の最小化の問題をここでは D P によって解くことにする。まず

$f_m(\varphi^{m-1,n})$; 第 n 区間第 $(m-1)$ 番目の操作変数が $\varphi^{m-1,n}$

であるという条件のもとに, 第 m 番目から第 M 番目の操作変数を最適化したとき

$$\begin{aligned} & \sum_{i=m-1}^M \left\{ h_1^{i,n-1}(y^{i,n-1}, \varphi^{i,n} + y^{i,n-1}, h_1^{i,n-1}) + h_2^{i,n-1}(y^{i,n-1}, \varphi^{i,n} \right. \\ & \quad \left. + y^{i,n-1}, h_2^{i,n-1}) \right\} + \sum_{i=m-1}^{M-1} \left\{ v_1^{i,n}(\varphi^{i,n} + y^{i,n-1}, \varphi^{i+1,n-1} + y^{i+1,n-1}, \right. \\ & \quad \left. v_1^{i,n}) + v_2^{i,n}(\varphi^{i,n} + y^{i,n-1}, \varphi^{i+1,n} + y^{i+1,n-1}, v_2^{i,n}) \right\} + \sum_{i=m-1}^M Z_{i+1}^n \\ & \quad \cdot (\varphi^{i,n} + y^{i,n-1}) \end{aligned}$$

かとする値

なる関数を定義すると, H^n を最小にすることは f_1 を達成するような $\varphi^{i,n} (i=1, 2, \dots, M)$ を求めることに等価となる。

さて, 上の定義より, $f_m(\varphi^{m-1,n})$ はつぎのような式として表わされる。

$$\begin{aligned}
f_M(\varphi^{M-1,n}) = \min_{y^{M,n}-C \leq \varphi^{M,n} \leq y^{M,n}} & \left[\sum_{i=M-1}^M \left\{ g_1^{i,n-1}(y^{i,n-1}, \varphi^{i,n} + y^{i,n-1}, \right. \right. \\
& \left. \left. g_1^{i,n-1}) + g_2^{i,n-1}(y^{i,n-1}, \varphi^{i,n} + y^{i,n-1}, g_2^{i,n-1}) \right\} + \left\{ g_1^{M-1,n}(\right. \right. \\
& \left. \left. \varphi^{M-1,n} + y^{M-1,n-1}, \varphi^{M,n} + y^{M,n-1}, g_1^{M-1,n}) + g_2^{M-1,n}(\varphi^{M-1,n} + \right. \right. \\
& \left. \left. y^{M-1,n-1}, \varphi^{M,n} + y^{M,n-1}, g_2^{M-1,n}) \right\} + \sum_{i=M-1}^M Z_{i+1}^n(\varphi^{i,n} + y^{i,n-1}) \right]
\end{aligned}
\tag{4.4.17}$$

上式より, $-C \leq \varphi^{M-1,n} \leq C$ なる変域内のあらゆる $\varphi^{M-1,n}$ に対し, それに対応する f_M および $\varphi^{M,n}$ を求めておく. その値を $\dot{\varphi}^{M,n}$ で表わす.

つまり, $f_{M-1}(\varphi^{M-2,n})$ は最適性の原理にしたがう繰り返しとの関係を用いると, 次式で示される.

$$\begin{aligned}
f_{M-1}(\varphi^{M-2,n}) = \min_{y^{M-1}-C \leq \varphi^{M-1,n} \leq y^{M-1,n}} & \left[\left\{ g_1^{M-2,n-1}(y^{M-2,n-1}, \varphi^{M-2,n} + \right. \right. \\
& \left. \left. y^{M-2,n-1}, g_1^{M-2,n-1}) + g_2^{M-2,n-1}(y^{M-2,n-1}, \varphi^{M-2,n} + y^{M-1,n-1}, \right. \right. \\
& \left. \left. g_2^{M-2,n-1}) \right\} + \left\{ g_1^{M-2,n}(\varphi^{M-2,n} + y^{M-2,n-1}, \varphi^{M-1,n} + y^{M-1,n-1}, \right. \right. \\
& \left. \left. g_1^{M-2,n}) + g_2^{M-2,n}(\varphi^{M-2,n} + y^{M-2,n-1}, \varphi^{M-1,n} + y^{M-1,n-1}, \right. \right. \\
& \left. \left. g_2^{M-2,n}) \right\} + Z_{M-1}^n(\varphi^{M-2,n} + y^{M-2,n-1}) + f_M(\varphi^{M-1,n}) \right]
\end{aligned}
\tag{4.4.18}$$

この式から, $\varphi^{M-2,n}$ を与えるとそれに対応して f_{M-1} および $\varphi^{M-1,n} (= \dot{\varphi}^{M-1,n})$ が求められる.

同様にして，一般的につぎの関係式が成立する。

$$\begin{aligned}
 f_m(\varphi^{m,n}) = & \min_{y^{m,n}-c \leq \varphi^{m,n} \leq y^{m,n-1}} \left[\left\{ g_1^{m-1,n-1}(y^{m-1,n-1}, \varphi^{m-1,n} + \right. \right. \\
 & y^{m-1,n-1}, g_1^{m-1,n-1}) + g_2^{m-1,n-1}(y^{m-1,n-1}, \varphi^{m-1,n} + y^{m-1,n-1}, \\
 & g_2^{m-1,n-1}) \left. \right\} + \left\{ g_1^{m-1,n}(\varphi^{m-1,n} + y^{m-1,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, g_1^{m-1,n}) \right. \\
 & \left. + g_2^{m-1,n}(\varphi^{m-1,n} + y^{m-1,n-1}, \varphi^{m,n} + y^{m,n-1}, g_2^{m-1,n}) \right\} + \\
 & Z_m^n(\varphi^{m-1,n} + y^{m-1,n-1}) + f_{m+1}(\varphi^{m,n}) \quad (4.4.19) \\
 & (m = 2, 3, \dots, M-1)
 \end{aligned}$$

式(4.4.19)で与えられる繰り返ししとの関係により，第 m 番目の操作変数 $\varphi^{m,n}$ の条件付き最適値が $\dot{\varphi}^{m,n}$ ($m = 2, 3, \dots, M-1$)がすべて求められる。そして，最後に f_1 と f_2 の間につぎのような関係式が導かれる。

$$f_1 = \min_{\varphi^{1,n}} [f_2(\varphi^{1,n})] \quad (4.4.20)$$

この最後の段階で求められる $\varphi^{1,n}$ は， f_1 の定義からわかるように，もはや条件付き最適政策ではなく，絶対最適値である。この $\varphi^{1,n}$ を $\dot{\varphi}^{1,n}$ と表わしておく。そうすると，すでに求めてあった $f_2(\varphi^{1,n})$ のうち $f_2(\dot{\varphi}^{1,n})$ に対応する $\dot{\varphi}^{2,n}$ をみつけたせば，それが $\varphi^{2,n}$ の最適値 $\dot{\varphi}^{2,n}$ になっている。同様にして第3番目の操作変数の最適値 $\dot{\varphi}^{3,n}$ は， $f_3(\varphi^{2,n})$ のうち $f_3(\dot{\varphi}^{2,n})$ に対応する $\dot{\varphi}^{3,n}$ を選ぶというように，すでに求めてあった f_2, f_3, \dots, f_M を利用しつつ，先とは逆に第 M 番目の操作変数に向って調べてゆくことにより，つぎつぎに

第 n 区間の絶対最適操作変数, すなわち, 第 n 区間のハミルトニアン H^n を最小にする $\dot{\varphi}^{m,n}$ ($m=1, 2, \dots, M$) が得られる。

このようにして, 離散型最大原理の適用によっても, 街路網の総損失を最小にするようなオフセットパターンを決定し得ることがわかったが, 上で述べたことはあくまでも原理的方法であって, 具体的な計算にあたってはつぎのような手順を踏まなければならない。

[計算手順]

ここに与えられた問題も始点 $x_1^1, y_1^1, y_2^1, \dots, y_M^1$ および終端点 $x_1^N, y_1^N, y_2^N, \dots, y_M^N$ がともに自由端となっているので, 前章 3.3.1 (1) の場合と同様に, 始点を固定端と考え, 始点の全領域について逐一最適解を求めるという方法を採る。

ステップ-1. $y_1^1, y_2^1, \dots, y_M^1$ を一組仮定し, 式 (4.4.2) より x_1^1 を計算する。

ステップ-2. $x_1^N, y_1^N, y_2^N, \dots, y_M^N$ を適用に仮定し, 式 (4.4.17) ~ 式 (4.4.20) により $\dot{\varphi}^{1,N}, \dot{\varphi}^{2,N}, \dots, \dot{\varphi}^{M,N}$ を求める。

ステップ-3. そうすると式 (4.4.5) および式 (4.4.6) より, $x_1^{N-1}, y_1^{N-1}, y_2^{N-1}, \dots, y_M^{N-1}$ が求められるので, まずこれを使って式 (4.4.12) により z_{m+1}^{N-1} ($m=1, 2, \dots, M$) を求め, つぎに式 (4.4.17) ~ 式 (4.4.20) から第 $(N-1)$ 区間に対応する最適操作変数 $\dot{\varphi}^{1,N-1}, \dot{\varphi}^{2,N-1}, \dots, \dot{\varphi}^{M,N-1}$ を計算する。

ステップ-4. ステップ-3 と同様の操作を $x_1^2, y_1^2, y_2^2, \dots, y_M^2$ および $\dot{\varphi}^{1,2}, \dot{\varphi}^{2,2}, \dots, \dot{\varphi}^{M,2}$ が求められるま

で繰り返す。

ステップ-5. ステップ-4で得られた $x_1^2, y^{m,2}, \dot{\varphi}^{m,2}$ ($m=1, 2, \dots, M$) から, 式(4.4.5)および式(4.4.6)を利用して, $x_1^1, y^{1,1}, y^{2,1}, \dots, y^{M,1}$ を求める。

ステップ-6. ステップ-5で求めた第1区間における状態変数がステップ-1で仮定した値に等しければステップ-7に, そうでない場合にはステップ-2にもどる。

ステップ-7. もとめられた x_1^N およびすべての $y^{m,n}$ ($m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N$) を記憶した後, 新たに始端点条件 $y^{1,1}, y^{2,1}, \dots, y^{M,1}$ を与え, x_1^1 を計算してステップ-2にもどる。

ステップ-8. すべての $x_1^1, y^{1,1}, y^{2,1}, \dots, y^{M,1}$ の組み合わせについて計算を完了したならば, 各始端点条件に対する x_1^N を比較し, その中で最小のものを見い出して, それに対応する $y^{m,n}$ ($m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N$) をとり出せば, それがここで求める各交差点の最適オフセット政策となっている。

4.5 傾斜法を用いた総損失最小化の手法⁵⁷⁾

同じ問題を傾斜法によって解く方法について考えてみる。ここで用いる傾斜法は, 各計算ステップの後で逐一導関数を求め直すという旧来の方法ではなく, ある1点で傾斜方向が決まれば近似的な極小値が得られるまで計算された方向に沿って系統的な探索を続ける点に特徴を有する。そして導関数の値が再び計算される前に, 与えられた方向に沿って目標関

数の値は小さくなり，このため導関数の値を求める回数が減少し，収束速度も早くなるとともに，次元数が増加するにつれてこの方法は急速に効率がよくなることがわかっている。

目標関数を $F(\theta, g)$ と表わすことにすると

$$F(\theta, g) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \{ h_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n}, g_1^{m,n}) + h_{g_2}^{m,n}(\theta^{m,n}, g_2^{m,n}) \} \\ + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N \{ v_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n}, g_1^{m,n}) + v_{g_2}^{m,n}(\theta^{m,n}, g_2^{m,n}) \} \quad (4.5.1)$$

のように与えられる。上式の損失関数に含まれる相対オフセットは，そのすべてが独立ではなく，前章式(3.5.3)で与えられるようなループに沿う実現条件式を考慮しなければならない。しかしながら，傾斜法を用いる場合には制約条件がない方が便利である。そこで，ここでは式(3.5.3)で与えられる等式から，逐次1個ずつ変数を消去してゆき，最終的にすべて独立な変数で目標関数を表示することを考える。このためには，実は式(4.3.5)の関係を利用すればよい。すなわち， $F(\theta, g)$ は

$$F(\hat{\theta}, g) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \{ h_{g_1}^{m,n}(\theta^{1,n} + \sum_{i=1}^{m-1} (\theta^{i,n+1} - \theta^{i,n}), g_1^{m,n}) + \\ h_{g_2}^{m,n}(\theta^{1,n} + \sum_{i=1}^{m-1} (\theta^{i,n+1} - \theta^{i,n}), g_2^{m,n}) \} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N \{ v_{g_1}^{m,n}(\theta^{m,n}, g_1^{m,n}) + v_{g_2}^{m,n}(\theta^{m,n}, g_2^{m,n}) \}$$

のように，対象街路網の一番上の水平方向路線に対応する相対オフセットと垂直方向路線に対応する相対オフセットによって表わされてしまう。

このように，すべて独立な相対オフセットで目標関数を表

示したならば、つまり、任意点（具体的には任意のオフセットパターン）における傾斜方向をいかにして求めるかについて考える。

まず、ここでは相対オフセットに形式的につぎのような上限値および下限値が規定されていることを利用して、以下に示すような規格化された座標を導入する。

すなわち、

$$-C \leq \theta^{l,n} \leq C, \quad -C \leq \theta^{m,n} \leq C$$

であるから、いま相対オフセットの変域を R とすれば

$$R = C - (-C) = 2C$$

となる。したがって

$$\psi^{l,n} = \frac{\{\theta^{l,n} - (-C)\}}{R} = \frac{(\theta^{l,n} + C)}{R} \quad (4.5.2)$$

$$\psi^{m,n} = \frac{\{\theta^{m,n} - (-C)\}}{R} = \frac{(\theta^{m,n} + C)}{R}$$

とおけば、 $\theta^{l,n}$, $\theta^{m,n}$ はすべて規格化された変数に変換される。そして、この $\psi^{l,n}$, $\psi^{m,n}$ は 0 から 1 までの間を変化することになる。ここではこの $\psi^{l,n}$, $\psi^{m,n}$ について偏導関数を数値的に求め、傾斜方向を決定することを考える。

すなわち、いま式 (4.5.1) の相対オフセットベクトル $\hat{\theta}$ を $\theta^{m,n}$ とそれ以外のオフセット $\hat{\theta}^{m,n}$ に分けるとき、 $\psi^{m,n}$ に関する偏導関数の線形近似は

$$\frac{\partial F(\hat{\theta}, f)}{\partial \psi^{m,n}} \doteq \frac{F(\hat{\theta}^{m,n}, \theta^{m,n} + \Delta \theta^{m,n}, f) - F(\hat{\theta}^{m,n}, \theta^{m,n}, f)}{\Delta \psi^{m,n}} \quad (4.5.3)$$

となる。ここで、上式右辺の $\Delta \theta^{m,n}$ は ψ 空間で求められなけ

ればならないから、まず式(4.5.2)の両辺を微分して

$$d\psi^{m,n} = \frac{d\theta^{m,n}}{R}$$

したがって、これを差分で近似すると

$$\Delta\theta^{m,n} = \Delta\psi^{m,n} \cdot R$$

となるから、いま $\Delta\psi^{m,n}$ をすべての m, n について等しく置き、この一定値 α とすると

$$\Delta\theta^{m,n} = \alpha \cdot R = 2\alpha C \quad (4.5.4)$$

となる。この α は実際には変域の分率である。

式(4.5.4)と式(4.5.3)に代入し、傾斜の方向が負になるように両方向考慮すると

$$\frac{\partial F(\hat{\theta}, \hat{\theta})}{\partial \psi^{m,n}} = \frac{F(\hat{\theta}^{m,n}, \hat{\theta}^{m,n} \pm 2\alpha C \cdot \hat{\theta}) - F(\hat{\theta}^{m,n}, \hat{\theta}^{m,n}, \hat{\theta})}{\alpha} \quad (4.5.5)$$

となる。左辺の正負の符号は上式の値が負になるようにいすれか一方をとればよい。

同様にして

$$\frac{\partial F(\hat{\theta}, \hat{\theta})}{\partial \psi^{i,n}} = \frac{F(\hat{\theta}^{i,n}, \hat{\theta}^{i,n} \pm 2\alpha C \cdot \hat{\theta}) - F(\hat{\theta}^{i,n}, \hat{\theta}^{i,n}, \hat{\theta})}{\alpha} \quad (4.5.6)$$

任意に出発点を決めるとき、上式(4.5.5), (4.5.6)によって傾斜の方向が決まるので、つぎにこの傾斜に沿った進み方について規定する必要がある。

まず最初のステップについては、そのステップ幅を $\Delta\theta_0^{i,n}$, $\Delta\theta_0^{m,n}$ としなると

$$\Delta\theta_0^{i,n} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \psi^{i,n}}}{\max \left\{ \max_n \left| \frac{\partial F}{\partial \psi^{i,n}} \right|, \max_{m,n} \left| \frac{\partial F}{\partial \psi^{m,n}} \right| \right\}} \cdot R\beta \quad (4.5.7)$$

$$\Delta \theta_0^{v,m,n} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \psi^{m,n}}}{\max \left\{ \max_n \left| \frac{\partial F}{\partial \psi^{1,n}} \right|, \max_{m,n} \left| \frac{\partial F}{\partial \psi^{m,n}} \right| \right\}} \cdot R\beta \quad (4.5.8)$$

ここに、式(4.5.7)、式(4.5.8)の分母は偏導関数の中の最大の絶対値であり、 β はステップの分率である。このように最初のステップ幅を与えると、最も急速に変化する相対オフセットの方向で $\Delta \theta_0$ は変域の $\beta\%$ となる。

このようにして、まず最初のステップが決定されると、旧来の方法ではこの最初のステップの後に、再び導関数の値を求め直すが、現在のプログラムでは与えられた勾配に沿って、局所極小値が得られるまで探索を続ける。すなわち、この方法では最初の出発点から探索を開始した場合の極小値の正確な位置を求めようとしているのではないわけである。

第2ステップ以降では以下のような規則にしたがって所与の勾配に沿うステップ幅が決定される。すなわち、いま

$\Delta \theta_k^{h,1,n}$; 第 k ステップに対する $\theta_k^{h,1,n}$ の増分

$\Delta \theta_k^{v,m,n}$; 第 k ステップに対する $\theta_k^{v,m,n}$ の増分

$\theta_k^{h,1,n}$; 第 k ステップにおける $\theta^{h,1,n}$ の値

$\theta_k^{v,m,n}$; 第 k ステップにおける $\theta^{v,m,n}$ の値

としたとき

$$\Delta \theta_k^{h,1,n} = \gamma \cdot \Delta \theta_{k-1}^{h,1,n}, \quad \Delta \theta_k^{v,m,n} = \gamma \cdot \Delta \theta_{k-1}^{v,m,n}$$

とし

$$\theta_{k+1}^{h,1,n} = \theta_k^{h,1,n} + \Delta \theta_k^{h,1,n}$$

$$\theta_{k+1}^{v,m,n} = \theta_k^{v,m,n} + \Delta \theta_k^{v,m,n}$$

とするのである。ここに γ はステップ係数で、1ステップ進

んで目標関数が減少した場合には、これを1より大きくとって、ステップ幅が前のステップ幅より大きくなるようにし、逆に目標関数が増加した場合には1より小さくとって、漸次ステップ幅を縮めながら進むようにする。

このようにして探索を続けるとき、目標関数があるステップで増加したならば、そのステップの間に局所極小値が存在している可能性があるわけで、そのステップ区間についてはステップ係数 γ の代りに低減係数 λ を採用し、つぎに示すような副次区間探索を行なう。

すなわち、まず

$$\Delta \theta_{k+1}^{l,n} = \lambda \cdot \Delta \theta_k^{l,n}$$

$$\Delta \theta_{k+1}^{u,n} = \lambda \cdot \Delta \theta_k^{u,n} \quad \text{ただし } 0 < \lambda < 1$$

とし、また副次区間探索を続けてゆくうえのステップ係数 γ は1より小さくとって、ステップが進むにつれてその幅が減少するようにするのである。

もし、副次区間探索で目標関数が減少しなければ、前の段階で目標関数が減少した点は、最初の勾配に沿っての局所極小値に十分近いと考えられる。したがって、この点で新しい勾配を定めるべく、再び偏導関数の値を計算し、この勾配に沿って探索を行なう。このようにして、最初のステップで目標関数が増加するまで同様の操作を続ける。

目標関数が最初のステップで増加したときには、先と同様にそのステップに対して低減係数 λ をとり、ステップ幅を減少し、上述のような副次区間探索を続けるが、もし、低減係数と考慮してもなおかつ目標関数が増加すれば、低減係数を

さらに小さくして λ^2 とする。

この2回の短縮でいずれも目標関数が増加すれば、前に目標関数が減少した点で微少差分を行なうと同時にステップ幅も小さくし、前述と同様な方法できめ細かい探索と実行する。

計算完了の基準としては、基本的区間を2回短縮し、その2回目の短縮において $\mu \cdot R$ 以下の初期ステップで目標関数が増加すれば、この点を極小値と考えることにすればよい。

ここに $\mu \ll 1$ であるが、実際の値は交通量の変動等など全体的バランスを考えて、適当に加減してよいであろう。

以上のようにして、任意点から出発した場合の街路網の総損失 $F(\theta, \phi)$ を極小ならしめるオフセットパターンが求められるが、一般に $F(\theta, \phi)$ の単峰性は保証されないために、得られた $F(\theta, \phi)$ の極小値は文字どおり極小値であって、最小値であるとは必ずしも言えない恨みが残る。

したがって、実際に最適オフセットパターンを求めようとする場合には複数のランダム初期オフセットパターンから出発して、そのつと極小値を求め、それらいくつかの極小値の中の最も小さい極小値をもって最小値とし、それに対応するオフセットパターンを最適オフセットパターンと考えるような方法を講ずる必要がある。

4.6 ラグランジュ未定乗数法を用いた総損失最小化の手法⁵⁷⁾

前章式(3.5.3)の等式制限のもとに式(4.5.1)のような目標関数(連続関数と仮定)の最小化を計る問題はラグランジュの未定乗数法の代表的問題である。すなわち、いま式(3.5.3)に対応する未定乗数を $\lambda^{m,n}$ とし、

$$F'(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \{ g_1^{m,n}(\theta, \phi_1^{m,n}) + g_2^{m,n}(\theta, \phi_2^{m,n}) \}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^N \{ v g_1^{m,n}(\theta^{m,n}, \theta_1^{m,n}) + v g_2^{m,n}(\theta^{m,n}, \theta_2^{m,n}) \} \\
& + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \{ \lambda^{m,n}(\theta^{m,n} + \theta^{m+1,n} - \theta^{m,n+1} - \theta^{m,n}) \}
\end{aligned}$$

としたとき,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F'(\theta, g)}{\partial \theta^{m,n}} &= \frac{\partial \{ v g_1^{m,n}(\theta^{m,n}, \theta_1^{m,n}) + v g_2^{m,n}(\theta^{m,n}, \theta_2^{m,n}) \}}{\partial \theta^{m,n}} \\
& + \lambda^{m+1,n} - \lambda^{m,n} = 0 \\
& (m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N-1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F'(\theta, g)}{\partial v^{m,n}} &= \frac{\partial \{ v g_1^{m,n}(\theta^{m,n}, \theta_1^{m,n}) + v g_2^{m,n}(\theta^{m,n}, \theta_2^{m,n}) \}}{\partial v^{m,n}} \\
& + \lambda^{m,n} - \lambda^{m,n-1} = 0 \\
& (m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F'(\theta, g)}{\partial \lambda^{m,n}} &= \theta^{m,n} + \theta^{m+1,n} - \theta^{m,n+1} - \theta^{m,n} = 0 \\
& (m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N-1)
\end{aligned}$$

を満足する $\theta^{m,n}$, $v^{m,n}$ を求めれば, 最適オフセットパターンが決定されることになる。

しかしながら, ラグランジュの未定乗数法を適用しうる条件として, $F(\theta, g)$ が凸関数であることが要求されるので, 上述の方法はかなりその使用範囲が限定される。なぜならば, 前章で検討した範囲では, 損失関数 $g(\cdot)$ は凸性を有していないため, 一般には $F(\theta, g)$ の凸性をあまり期待できないからである。

$F(\theta, g)$ を凸関数にするための1つの便法として, つぎのようものが考えられる。すなわち, $F(\theta, g)$ が凸関数にな

るためには、それを構成するすべての損失関数 $g(\cdot)$ が凸関数であれば十分であることを利用する。

前章で検討した結果によると、一般に損失関数は最大値と最小値を1つつ有する、たとえば図-4.6.1(a)のような曲線となる。いま、この曲線で損失の最大値を与える相対オフセットを $\bar{\theta}$ としたとき、この曲線を θ 軸に沿って $\bar{\theta}$ だけ左に移動させた曲線を考える。この関数をいま $g(\theta', \xi)$ とすると、

$$\theta' = \theta - \bar{\theta} \quad (4.6.1)$$

ける関係があることは明らかである。 $g(\theta', \xi)$ を図示すると図-4.6.1(b)のように、信号の周期性から、原点とCの点に最大値があり、中間点に最小値が位置する曲線となる。

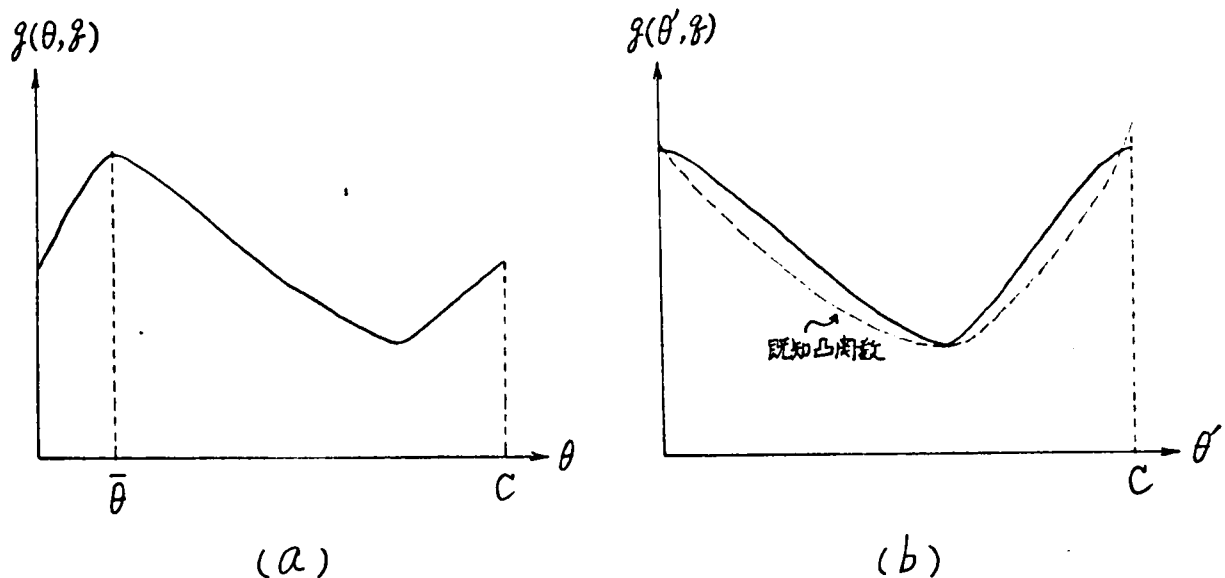


図-4.6.1 損失関数の凸関数化

したかつて、これを破線で示したような既知凸関数で近似することが可能となる。

このような操作をすべての損失関数について行なえば、そ

の総和としての $F(\theta, g)$ が凸関数になることは先に述べたとおりであり、この時点においてはラグランジュの未定乗数法が適用できることになるのである。ただし、その場合の制約条件式は、式(3.5.3)に対応するものとして、つぎのようなものを考えなければならない。

すなわち、式(3.3.42)より $\theta = \theta' + \bar{\theta}$ なるから、この関係を式(3.2.43)に代入して

$$\begin{aligned} & (\bar{v}_{m,n'} + \bar{v}_{m,n}) + (k_{\theta^{m+1,n'}} + k_{\bar{\theta}^{m+1,n}}) - (\bar{v}_{\theta^{m,n+1}'} + \bar{v}_{\bar{\theta}^{m,n+1}}) \\ & - (k_{\theta^{m,n'}} + k_{\bar{\theta}^{m,n}}) = 0 \end{aligned}$$

が得られる。

このようにして、 $k_{\theta^{m,n'}}$ および $\bar{v}_{\theta^{m,n'}}$ の最適値 $k_{\theta^{m,n'}}^*$, $\bar{v}_{\theta^{m,n'}}^*$ が求められたならば、本来の相対オフセットの最適値 $k_{\bar{\theta}^{m,n}}^*$, $\bar{v}_{\bar{\theta}^{m,n}}^*$ は

$$k_{\bar{\theta}^{m,n}}^* = k_{\theta^{m,n'}}^* + k_{\bar{\theta}^{m,n}} \quad (m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N-1)$$

$$\bar{v}_{\bar{\theta}^{m,n}}^* = \bar{v}_{\theta^{m,n'}}^* + \bar{v}_{\bar{\theta}^{m,n}} \quad (m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N)$$

なる関係によって容易に決定されることは言をまたないであろう。

問題は、 $g(\theta', g)$ をいかにうまく既知の凸関数で近似できるかであるが、オフセットパターンは個々の損失関数そのものよりも、その相対的大きさによって決まることを考えれば、それほど厳密に近似させなくても、かなり好ましいパターンが得られることが予想される。

なお、上述の $F(\theta, g)$ の凸関数化の手法は、前節で述べた

傾斜法による方法にも適用できる。

4.7 各方法の比較⁵⁰⁾

まず、 DP による方法は先にも述べたように、損失関数 $g(\theta, \theta)$ がいわゆる関数形をしていなくてもよく、その意味では使用範囲が広いこと、探索格子間隔を適当にとれば必ず絶対最小損失を与えるオフセットパターンが得られること等が利点として挙げられる。しかしながら、探索原理が列挙法を基盤としているために、計算時間がかかるおそれがあり、対象街路網が大きい場合にはいわゆるプログラム形成方式の制御には適しなくなる可能性があることは一つの難点といえよう。

離散型最大原理による方法は、損失関数が関数として与えられることが必要で、 DP に比して利用範囲がせまめられる。計算方法には、繰り返し計算が要求されるという煩雑さがあり、したがって、計算時間もかなりかかると予想されることは欠点とすべきであろう。しかしながら、もし各区間におけるハミルトニアン⁵¹⁾の最小化が本文で述べたような DP を使わない簡単な方法で行なわれるならば、 DP 法に比して効率的なオフセットパターンの決定手法になり得る。

傾斜法による方法は、損失関数が連続関数でなければならぬという制約がある反面、その関数形さえ与えられれば、ある街路区間の交通損失が任意区間の相対オフセットに影響を受ける場合にも十分に適用可能であるという便宜性をもっている。また、計算原理が単純であるため、そのプログラム作成は容易であり、計算時間もあまりかからないことから、街路網の規模が大きくても使用に耐えられると考えられる。

しかしながら、目的関数である総損失が単峰性を有していない場合には、必ずしも総損失最小のオフセットパターンが得られないことは欠点であろう。

ラグランジュの未定乗数法による方法は、傾斜法と同様に、損失関数が連続関数であることが要求されるが、その関数は任意の相対オフセットを含んでいてもよく、その意味では利用範囲が広い。しかしながら、目的関数は凸性を有していなければならないので、損失関数の凸関数化を行わなければならないかぎり、極めて、特殊な場合だけにしか利用できない。目的関数がたまたま凸性を有している場合であれば、最適オフセットパターンを求める問題は連立方程式を解く問題に変換されるので、比較的効率的な方法になりうる可能性もある。

最後に、図-4.7.1に示したような小規模の街路網を対象に、2.4.1で求めた損失関数

を用いて実際に数値計算を行うことによって、各手法の比較を行ってみよう。この図において、矢印とともに記してある数字は、その方向の1車線あたり1時間交通量を、各リンク上の数字はそのリンクの長さ(m)を、また丸で囲まれた数字は説明の便宜上の

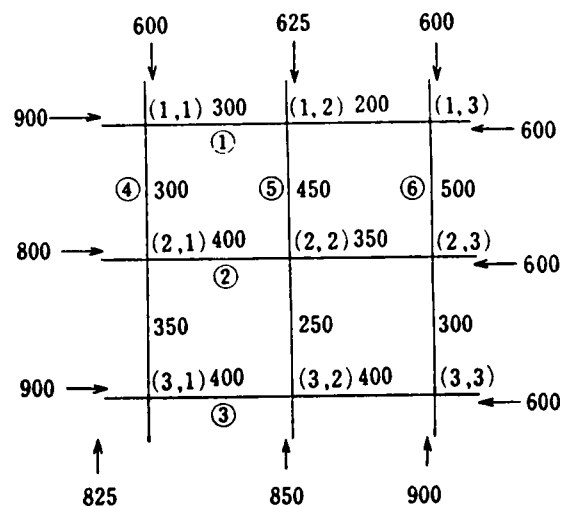


図-4.7.1 計算例の対象街路網

路線番号をそれぞれ表わしている。なお、交差点幅は50mとし、道路は片側2車線で、各交差点での右左折はないものとする。また、共通周期は100秒、スプリットはすべて50%とする。

図-4.7.2 は、この街路網に一方通行規制を敷いた場合の交通量とその方向であるが、この場合の交通量配分について説明しておく、たとえば西→東の交通でいえば、図-4.7.2 の該当方向の交通量は、図-4.7.1 の中央街路②において西から東に向かう交通量の半分づつをその両わきの街路①、③に転換させ

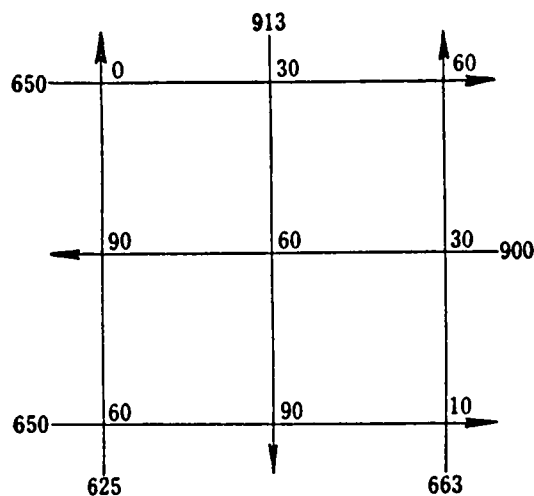


図-4.7.2 一方通行の方向と配分交通量

た結果であり、また図-4.7.2 の中央街路②を東から西へ向かう交通量は図-4.7.1 における該当方向の交通の総計である。南北方向についてもまったく同様である。なお、2.4.1 の損失関数を導入する際、各リンクについて θ の値を与える必要があるが、これについては上流側交差点から出発して、下流側交差点に流入するまでに要する時間を仮定した。

計算結果は表-4.7.1 に示したとおりである。本表より、DP による方法は常に最も小さい損失を与えること、離散型最大原理による方法は、二方通行の場合は別として、一方通行の場合は DP 法よりかなり大きな損失となり、また、計算時間は DP 法より 15% 程度多いこと、傾斜法による方法は計算時間は短かいが（表に示した計算時間は、100 個の極値を求める時間）、総損失は DP 法に比べ、二方通行で約 30%、一方通行では約 90% も大きくなっていること、また予想されたようにラグランジュの未定乗数法による方法では解が求められなかったこと等の事実が読みとれる。

表-4.7.1 各手法による計算結果

	二 方 通 行				一 方 通 行			
	DP	MP	GR	LG	DP	MP	GR	LG
計算時間(秒)	344	427	115	—	366	431	72	—
総損失	13,737	13,799	18,037	—	5,973	6,827	11,329	—
オフセットパターン(秒)	(1,1)	0	0	—	0	0	0	—
	(1,2)	60	60	—	80	90	66	—
	(1,3)	10	30	—	40	60	26	—
	(2,1)	30	50	—	20	30	30	—
	(2,2)	90	0	—	50	60	54	—
	(2,3)	50	0	—	70	90	78	—
	(3,1)	70	90	—	50	60	66	—
	(3,2)	40	50	—	20	30	14	—
	(3,3)	0	40	—	0	10	25	—

注) DP; DPによる方法
 MP; 離散型最大原理による方法
 GR; 傾斜法による方法
 LG; ラグランジュの未定乗数法による方法

4.8 結語

以上、制御対象街路網にループの存在を認めた場合のオフセット最適化の方法について述べた。まず、DPを用いたスルーバント最大規準によるオフセット設定法は、各路線のスルーバントのウェイトづけが可能であり、かつ各街路区間速度がそれぞれ異なるとしてもよいという特徴をもつが、計算量は極めて多くなる。実際の街路網で、スルーバントを規準とした制御を行なう場合には、スルーバントの性格からしても、ここに示したような網全体の最大化を図るよりも、街路網から選ばれた何本かの路線に対してスルーバント最大化を図る方がよいであろう。その場合においても、交通量が少ないということが前提となることは言うまでもない。

つぎに、網全体の交通損失を最小にするオフセット設定法について、いくつかの方法を示した。まず、DPによる方法は、計算時間を多く要するが、交通損失関数のいかににかかわらず、最小損失に対応するオフセットパターンを与えること、待ち行列長に制限がある場合をはじめとする種々の条件が付加された問題にも適用可能であることに特徴を有している。

離散型最大原理による方法は、収束計算を要するため、DPによる方法よりもさらに多くの計算時間がかかり、かつ必ずしも最小損失を与えない。また、損失関数は連続関数である方が望ましく、多くの条件がついている場合には、計算時間がさらに長くなる可能性がある。

傾斜法による方法は、目的関数となる街路網の総損失が必ずしも凸関数を形成しないので、局小値しか求め得ないが、計算時間が短かく街路網が大きい場合にも適用可能である。

ラグランジュの未定乗数法による方法は、やはり目的関数が凸関数である保証がないことから、その実際の適用にあたっては、相対オフセットとの関連における各街路区間の交通損失関数を凸関数化する必要がある。

ここで述べた、街路網の全体的観点からオフセットの最適化を図るという方法は、その前提として、交通損失関数が各街路区間に対応して与えられており、その関数形はある程度安定していることが要求されるので、実際の街路網への適用条件として、交通量がある程度多く、その流れが定常的で、かつ、いずれの交差点においても、容量を上回る交通需要がないこと等が挙げられる。

交通損失関数の与え方としては、第2章で述べたようなシミュレーションによる方法とか実際の街路での実験および調査による方法などが考えられるが、いずれにしても、現実の対象街路区間で発生する交通損失を十分表現できるようにする努力が肝要である。

第5章 制御方式の比較検討

5.1 概説

本章では、まず第2章で得られた交通損失関数を用い、小規模街路網を対象に実際に計算を行なうことによって、街路網から適当に選ばれた何本かの路線に、路線系統制御を行なう制御方式、最適な最大ツリーを形成し、そのツリーに対して路線系統を行なう制御方式およびDPを用いた、ループの最適化を基盤とした制御方式の、3つのオフセット制御方式について比較検討を行なう。

また、制御システムの構成として、各制御方式の特徴をふまえて、これらの街路網信号制御における位置づけについて述べ、ついで、交通状態による制御方式すなわち制御モードの問題、さらには、制御パターンの継続時間と変更方法についてふれる。最後に、信号制御がその効果を十分に発揮するためには、一方通行規制をはじめとする種種の交通規制と一体化すべきであることを述べる。

5.2 計算例による上記各種制御方式の比較検討⁵⁹⁾

本節では、第3章および第4章で述べた3つの制御方式、すなわち、路線系統制御方式、ツリー形成による制御方式、およびループの最適化を基盤とした制御方式（以下、ここでは簡単のために全体的制御とよぶ）について、前章第7節で用いた小規模街路網を対象に、実際の数値計算をとおして、街路網全体の総損失の大きさの比較検討ならびにオフセットパターンの比較検討を行なう。なお、交通損失については、街路区間相互の独立性を前提とし、相対オフセットおよび交通量を独立変数とした関数として、第2章のシミュレーション

ンから得られたものを採用する。

オフセット探索の格子間隔は、前章での計算と同じく10秒とする。また、使用計算機はFACOM 230-60 である。

5.2.1 ランダム・オフセットパターン

各交差点のオフセットをまったくランダムに設定した場合であり、現実の問題では系統制御をまったく行わない場合に相当する。これは系統制御を行なった場合に対する比較の対象としての意味をもつ。計算は100個のランダム・パターンに対応する街路網全体の交通損失をアウトプットするようにしたが、以下ではそのうちの最大値、最小値および平均値のみを掲げる。

(1) 速度損失

この速度損失とは、第2章の流体的シミュレーションモデルに対応する交通損失を称するものとする。

a) 二方通行の場合

最大値は28,292, 最小値は19,438, 平均値は24,181である。

b) 一方通行の場合

最大値は33,894, 最小値は14,005, 平均値は23,941である。二方通行の場合と一方通行の場合の平均値は似かよった値であるが、最大値では一方通行の方が19.8%も大きく、逆に最小値では一方通行の方が28.0%少ない。これは二方通行の場合と異なっており、一方通行の場合には流れる方向が1つの方向に規定されるために、ランダムオフセットを設定したとき、そのパターンが比較的好ましい場合には損失は大幅に減少するが、たまたま不都合なパターンになると多くの交通が悪影響を被むることになり、損失

が急激に増えるということが起るからであると推察される。

(2) 走行所要時間損失

a) 二方通行の場合

最大値は 135,688 秒, 最小値は 105,602 秒, 平均値は 119,270 秒である。

b) 一方通行の場合

最大値は 145,200 秒, 最小値は 87,130 秒, 平均値は 118,367 秒である。この場合も平均値どうしでは, 一方通行と二方通行の場合とではほとんど変わらないが, 最大値では一方通行の場合が二方通行の場合より 7% 上回り, 逆に最小値では 17.5% 低い値となっている。

(3) 待ち時間損失

a) 二方通行の場合

最大値は 67,384 秒, 最小値は 40,689 秒, 平均値は 53,056 秒である。

b) 一方通行の場合

最大値は 77,556 秒, 最小値は 28,282 秒, 平均値は 52,164 秒である。二方通行との増減比較は最大値で +15.9%, 最小値で -30.5%, 平均値で -16.8% となる。

(4) 停止回数損失

式(2.4.8)～式(2.4.13)で与えられるような関数形を使わず, シミュレーションから得られた値そのままを使って計算した(シミュレーションによって与えられていないような交通量については既知のデータから内挿して求めた)。

a) 二方通行の場合

最大値は 1,107 回, 最小値は 608 回, 平均値は 813 回である。

b) 一方通行の場合

最大値は 1,114 回, 最小値は 500 回, 平均値は 794 回である。二方通行との増減比較は最大値で +10.6%, 最小値で -17.8%, 平均値で -23.4% である。

以上をまとめると, ランダム・オフセットパターンの場合つまり系統制御をしないときには, 一方通行規制を行なうと, 平均値的あるいは幸運な場合には交通損失は二方通行の場合に比べて減少するが, 最悪の場合にはかえって増加する懸念があるということである。

5.2.2 路線系統制御方式

系統制御をする路線は, 図-5.2.1 に示したように ①, ②, ③ の 3 本の路線とする。図中, 点線で示した垂直方向の路線に対するオフセットづけは, まったくでたために与えるものとする。

(1) 速度損失

a) 二方通行の場合

総損失は 22,610 で, これは二方通行ランダムパターンの平均損失より 6.5%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 5.6% 少ないが, 一方通行ランダムパターンの最小損失より 61.4% 多くなっている。

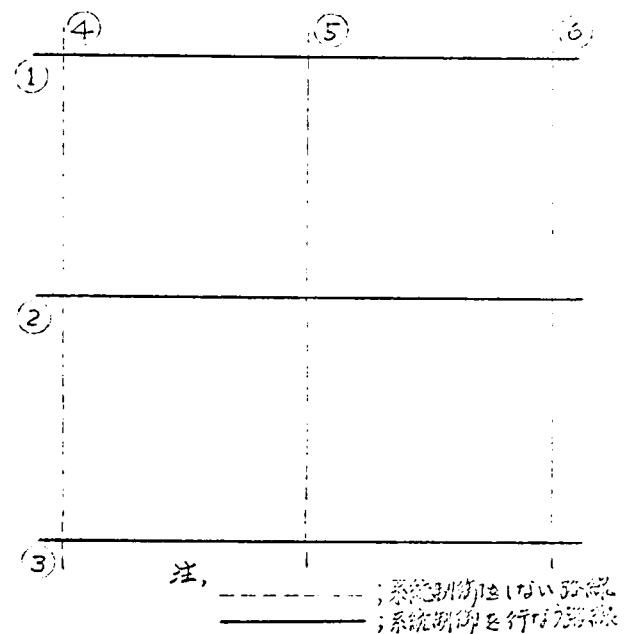


図-5.2.1 系統制御路線

b) 一方通行の場合

総損失は 17,484 で, これは二方通行ランダムパターンの平均損失より 27.7%, 一方通行ランダムパターンの平均

損失より 27.0%, さらに二方通行の場合の路線系統制御より 27.7%少ないが, 通行ランダムパターンの最小損失より 24.8%多い。すなわち, 図-5.2.1 に示した3本の路線で系統制御を行なうよりも少ない発生損失を, ランダムに選ばれたオフセットパターンに期待できることを示している。

(2) 走行所要時間損失

a) 二方通行の場合

走行所要時間の合計は 118,526 秒で, 二方通行ランダムパターンの平均損失より 0.6%少ないが, 一方通行ランダムパターンの平均損失を 0.1%上回っている。また, 一方通行ランダムパターンの最小損失に対しては 36.0%増となっている。

b) 一方通行の場合

損失合計は 157,222 秒となり, 二方通行ランダムパターンの平均損失を 31.8%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を 32.8%, 二方通行路線系統制御の総損失を 32.6%上回っている。これは系統制御を行なう路線における走行所要時間はかなり減少するものの, それらの路線相互間には何らの関連ももたせないため, 系統制御の対象とならない路線のオフセットが, たまたま好ましくないパターンをとった場合には, 一方通行下では1つの方向に多くの交通が流れているため, 網全体の損失が二方通行路線系統制御の場合よりかえって増加する恐れがあることを示している。

(3) 待ち時間損失

a) 二方通行の場合

総損失は 50,963 秒で, これは二方通行ランダムパターン

の平均損失より 3.9%, 一方通行ランダムパターンでの平均損失より 2.5% 少ない。

b) 一方通行の場合

総損失は 52,238 秒で、二方通行ランダムパターンの平均損失に比べて 1.5% 少ないが、一方通行ランダムパターンでの平均損失を 0.1%, また、走行所要時間損失の場合と同様に二方通行路線系統制御の総損失を 2.5% それぞれ上回っている。

(4) 停止回数損失

計算は損失関数をいっさい用いずに、1つのオフセットに対する停止回数損失を逐一シミュレーション結果から読み取って、それをすべてデーターとして記憶させ、計算の過程でその中のおのおのの値をオフセットに応じてひき出すという方法をとった。

a) 二方通行の場合

総損失は 591 回で、これは二方通行ランダムパターンでの平均損失を 27.3%, 一方通行ランダムパターンでの平均損失を 25.6% 上回っている。

b) 一方通行の場合

総損失は 608 回で、これは二方通行ランダムパターンでの平均損失より 25.2%, 一方通行ランダムパターンでの平均損失より 23.4% 少ない値であるが、二方通行の路線系統制御の場合に比べて 2.9% 多い値となっている。

以上が、路線系統制御を行なった場合の発生損失の増減比較であるが、系統制御をまったく行なわないランダムオフセットパターンでの平均損失に比べて、予想外に減少割合が小さいことがわかる。一方通行走行所要時間損失の場合などは、

かえって大幅に増加しているという一見奇妙な結果がでてくる。さらに、速度損失を除いては、一方通行下の発生損失が二方通行下の発生損失よりも多くなっている。

これは走行所要時間損失のところでも述べたように、系統制御が行なわれない路線がオフセットがまったくランダムに設定されているので、そのパターンがあまり好ましくないものであると、一方通行下では一方向に大量の交通が流れるために、そこで発生する損失が予想以上に多くなって、系統路線での損失の減少分を相殺し、さらにはそれを上回ってしまいうこともあるからであると判断される。これに対して二方通行の場合には、仮りに一方向に対するオフセットパターンが悪い場合でも、対向方向のパターンが比較的よくなることが多く、したがって、系統制御をしない路線の発生損失も一方通行の場合に比較すれば、それほど多くなりはないのである。

以上のようないふことからしても、図-5.2.1に示したように、おのおの独立な何本かの路線に対して系統制御を組む場合には、系統制御を行なわれない路線についてのオフセットについても十分注意を払わない限り、あまり大きな効果を期待できない恐れがあることを銘記しておく必要がある。このことに答える一つの方策として、つぎに述べるツリー形成による制御方式があるのである。

なお、各損失に対応した路線系統制御のオフセットパターンは表-5.2.1に示したとおりである。

5.2.3 ツリー形成による制御方式

選ばれた最大ツリーは図-5.2.2に示したとおりであるが、このツリーを形成する路線においてのみ系統制御が行なわれる。なお、点線で示した部分については、ループに沿うオフ

表-5.2.1 路線系統制御のオフセットパターン (単位秒)

損失 発生 システム	速度損失		走行時間損失		待ち時間損失		停止回数損失	
	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行
(1.1)	0	0	0	0	0	0	0	0
(1.2)	40	30	40	30	30	30	30	30
(1.3)	40	50	60	50	50	50	50	50
(2.1)	20	50	0	30	30	60	20	10
(2.2)	40	20	40	0	60	30	40	80
(2.3)	70	70	70	50	80	80	60	50
(3.1)	60	0	90	70	40	80	10	40
(3.2)	10	30	40	0	90	10	40	60
(3.3)	20	30	50	0	0	10	50	80

セットの実現可能条件より系
統制御を行なうことはもはや
不可能である。

(1) 速度損失

a) 二方通行の場合

損失合計は 16,151 である。

これは二方通行ランダムパ
ターンの平均損失より 31.5
%, 一方通行ランダムパタ
ーンの平均損失より 30.8%,

二方通行路線系統制御の総損失より 26.8%, 一方通行路線
系統制御の総損失より 5.3% それぞれ少なくなっている。

b) 一方通行の場合

得られた損失合計は 8,950 で、二方通行ランダムパターン

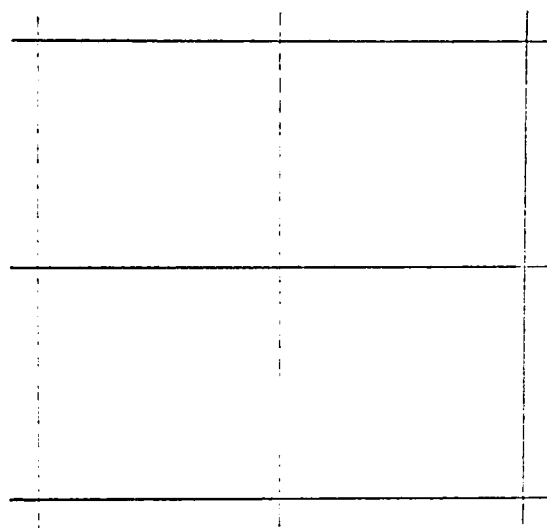


図-5.2.2 系統制御最大ツリー

の平均損失より 63.0%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 62.6%, 二方通行路線系統制御の総損失より 60.4%, 一方通行路線系統制御の総損失より 48.4%, さらに二方通行最大ツリー系統制御の損失より 46.0% 少なくなっており, かなりの効果を発揮していることがわかる。

(2) 走行所要時間損失

a) 二方通行の場合

総走行所要時間損失は 94,046 秒で, これは二方通行ランダムパターンの平均損失より 21.1%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 20.5%, 二方通行路線系統制御の損失より 20.7%, 一方通行路線系統制御の総損失より 40.2% 最も小さくなっている。

b) 一方通行の場合

総損失は 73,267 秒で, 二方通行ランダムパターンの平均損失より 38.6%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 38.1%, 二方通行路線系統制御の損失合計より 38.2%, 一方通行路線系統制御の損失合計より 53.4%, さらに a) の二方通行最大ツリー系統制御の損失より 22.1% 少ない。

(3) 待ち時間損失

a) 二方通行の場合

総待ち時間は 29,714 秒で, これは二方通行ランダムパターンの平均損失より 44.0%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 43.0%, 二方通行路線系統制御の総損失より 41.7%, 一方通行路線系統制御の総損失より 43.1% 少ない。

b) 一方通行の場合

総待ち時間は 14,012 秒で, 二方通行ランダムパターンの平

均損失より 76.3%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 73.1%, 二方通行路線制御の総損失より 72.5%, 一方通行路線系統制御の総損失より 73.2%, 二方通行最大ツリー系統制御の総損失より 52.8% をそれぞれ減少している。

(4) 停止回数損失

この場合にも損失関数は用いずに計算を行なった。

a) 二方通行の場合

総停止回数は 464 回で、二方通行ランダムパターンの平均損失を 42.9%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を 41.6%, 二方通行路線系統制御の総損失を 21.5%, 一方通行路線系統制御の総損失を 23.7% 下回っている。

b) 一方通行の場合

総停止回数は 136 回で、二方通行ランダムパターンの平均損失より 83.6%, 一方通行ランダムパターンの平均損失より 82.9%, 二方通行路線系統制御の損失より 77.0%, 一方通行路線系統制御の損失合計より 77.6%, また、二方通行最大ツリー系統制御より 70.7% 減少している。

以上から、一般に最大ツリーを構成する路線の系統制御によって、5.2.2 で述べたような路線系統制御の場合と比べても諸損失をかなり減少させることがわかるが、こうしたことから、図-5.2.1 に示したような独立な 3 本の路線に加えて、垂直方向にもう 1 本路線を追加したツリーとしての系統制御は、対象街路網を路線系統制御を基盤とした制御を行なう場合には必ず行なった方がよいといえそうである。

なお、得られたオフセットパターンを表-5.2.2 にまとめて示しておいた。

5.2.4 路線系統制御の効果を生かした全体的制御

表-5.2.2 ツリー形成制御時のオフセットパターン (単位秒)

損失 発生 系統	速度損失		走行所要 時間損失		待ち時間 損失		停止回数 損失	
	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行
(1,1)	0	0	0	0	0	0	0	0
(1,2)	40	30	40	30	30	30	30	30
(1,3)	40	50	60	50	50	50	50	50
(2,1)	60	90	40	90	50	90	70	90
(2,2)	80	60	80	60	80	60	90	40
(2,3)	10	10	10	10	0	10	10	10
(3,1)	10	50	10	50	10	50	40	40
(3,2)	60	80	60	80	60	80	70	60
(3,3)	70	80	70	80	70	80	80	80

前章 4.3.4 (5) で述べた方式で，図-5.2.1において，実線に相当する路線①，②，③の相対オフセットは5.2.2で求められたパターンに保持したままで，全体的な損失を最小にするオフセット制御である。なお，損失としてはこの場合に限る走行所要時間のみを対象とした。

a) 二方通行の場合

全体での走行所要時間損失は92,023秒で，二方通行ランダムパターンの平均損失に比べ22.8%，一方通行ランダムパターンの平均損失に比べ22.3%少なく，また，5.2.2の単なる路線系統制御の場合に比べ，二方通行では22.4%，一方通行では41.5%，さらに最大ツリー系統制御の総損失に比べても二方通行の場合には2.7%少なくなっている。しかしながら，一方通行最大ツリー系統制御の場合に比べると20.4%多い。

b) 一方通行の場合

この場合は、偶然ながら 3.4.3 の一方通行最大ツリー系統制御の場合と総損失，オフセットパターンともまったく一致したので，損失の増減比較は 5.2.3 (2) b) と同じである。

表-5.2.3 は a), b) のオフセットパターンである。なお，上の結果からは本方式は最大ツリー系統制御方式に比べて，それほど優れた方式ではないといえるが，一般的にこのことが成り立つか否かは断定できない。

5.2.5 全体的制御

ここで用いるオフセットパターン設定のための最適化の方法は DP 法である。5.2.2 の場合にしろ，5.2.3 の場合にしろ路線系統制御を基盤とした制御は，ある選ばれた路線のみに着目して，その路線内の損失をいかに減らすかを考えるわけであるが，この場合の制御は路線を特に指定せずに全体的な損失最小を図る。したがって，当然のことながら 5.2.2 で系統制御の対象となった路線における最適路線系統オフセットは若干くずされる可能性がでてくる。

表-5.2.3 路線系統+全体的制御の
オフセットパターン
(単位秒)

損失別 通行システム 交差点名	走行時間損失	
	二方向	一方通行
(1.1)	0	0
(1.2)	40	30
(1.3)	60	50
(2.1)	50	90
(2.2)	90	60
(2.3)	20	10
(3.1)	10	50
(3.2)	60	80
(3.3)	70	80

(1) 速度損失

a) 二方向通行の場合

街路網全体での総速度損失は 13,737 で，これは二方向通行ランダムパターンの平均損失を 43.2%，一方通行ランダムパターンの平均損失を 42.6%，二方向通行路線系統制御の

総損失を39.2%, 一方通行路線系統制御の総損失を21.4%, 二方通行最大ツリ-路線系統制御の総損失を17.0%をそれぞれ下回った値であるが, 一方通行最大ツリ-系統制御より53.5%多い値となっている。

b) 一方通行の場合

総速度損失は5,973で, 二方通行ランダムパターンの平均損失を75.3%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を75.1%, 二方通行路線系統制御の総損失を73.6%, 一方通行路線系統制御の総損失を65.8%, 二方通行最大ツリ-系統制御の総損失を63.9%, 一方通行最大ツリ-系統制御の総損失を33.3%, さらにa)の二方通行全体的制御の損失を56.5%下回っている。

(2) 走行所要時間損失

a) 二方通行の場合

総走行所要時間損失は785,141秒で, 二方通行ランダムパターンの平均損失を28.6%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を28.1%, 二方通行路線系統制御の総損失を28.2%, 一方通行路線系統制御の総損失を45.8%, 二方通行最大ツリ-系統制御の総損失を9.4%, 二方通行の(路線系統制御+全体的制御)の損失を7.5%下回っているが, 一方通行最大ツリ-系統制御の損失および一方通行の(路線系統制御+全体的制御)の損失より16.2%大きい値となっている。

b) 一方通行の場合

総走行所要時間損失は64,527秒で, 二方通行ランダムパターンの平均損失を45.9%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を45.5%, 二方通行路線系統制御の損失を45.6

%, 一方通行路線系統制御の損失を 59.0%, 二方通行最大ツリー系統制御の損失を 31.4%, 一方通行最大ツリー系統制御の損失を 11.9%, 二方通行の(路線系統制御+全体的制御)の損失を 29.9%, 一方通行の(路線系統制御+全体的制御)の損失を 11.9%, さらに a) の二方通行全体的制御の損失を 24.2% それぞれ下回っている。

(3) 待ち時間損失

a) 二方通行の場合

総損失は 22,713 秒で, 二方通行ランダムパターンの平均損失を 57.2%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を 56.5%, 二方通行路線系統制御の損失を 55.4%, 一方通行路線系統制御の損失を 56.5%, 二方通行最大ツリー系統制御の損失を 23.6% 下回っているが, 一方通行最大ツリー系統制御の損失より 62.1% 大きい値となっている。

b) 一方通行の場合

総損失は 6,735 秒で, 二方通行ランダムパターンの平均損失を 87.3%, 一方通行ランダムパターンの平均損失を 87.1%, 二方通行路線系統制御の損失を 86.8%, 一方通行路線系統制御の損失を 87.1%, 二方通行最大ツリー系統制御の損失を 77.1%, 一方通行最大ツリー系統制御の損失を 51.9%, 二方通行全体的制御の損失を 70.3% それぞれ下回っている。

(4) 停止回数損失

停止回数とオフセットの関係は前章で検討したように, 1 つの既知関数で表わすことは極めて困難であり, 強いて表わすとしても式(2.4.8)~式(2.4.11)のような不連続関数となる。したがって, ここでは停止回数の $g(\theta, \varphi)$ としてシミ

エレーションから得られた値をそのまま用いた場合(すなわち関数形を用いない場合)と、式(2.4.8)～式(2.4.11)のよう関数を導入した場合の2つの場合について、最適オフセットパターン決定のための計算を遂行し、両者の間にどれだけの相違が生じてくるか検討してみることとした。

a) 二方通行の場合

不連続関数を用いた場合の総停止回数は455回、関数形を用いない場合の総停止回数は456回で殆んど一致した値となった。これは二方通行ランダムパターンの平均損失より43.9%、一方通行ランダムパターンの平均損失より42.6%、二方通行路線系統制御の損失より23.0%、一方通行路線系統制御の損失より25.2%、二方通行最大ツリー系統制御の損失より1.7%を小さくしているが、一方通行最大ツリー系統制御の損失より235.3%多くなっている。なお、後に示すように不連続関数を用いた場合のオフセットパターンと関数形を用いない場合のオフセットパターンは完全に一致した。

b) 一方通行の場合

不連続関数を用いた場合および関数形を用いない場合の総停止回数はそれぞれ178回、121回と相互にかなり異なった値を示した。対応するオフセットパターンも後に示すように若干異なっている。

いま、後者の総停止回数を全体的制御の最小損失と考えると、それは二方通行ランダムパターンの平均損失より85.1%、一方通行ランダムパターンの平均損失より84.8%、二方通行路線系統制御の総損失より79.5%、一方通行路線系統制御の総損失より80.0%、二方通行最大ツリー系統制御

の総損失より 73.9%, 一斉通行最大ツリー系統制御の総損失より 73.5% を小さくしている。

以上の各ケースに対応する街路網のオフセットパターンを示すと表-5.2.4 のようになる。本表を見ると、遅延損失、走

表-5.2.4 全体的制御のオフセットパターン

(単位秒)

損失種類 通行システム 交差点名	遅延損失		走行所要 時間損失		待ち時間 損失		停止回数の 損失		停止回数 (1)		停止回数 (2)	
	二方 通行	一方 通行	一方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行	二方 通行	一方 通行
(1,1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1,2)	30	20	40	20	20	20	30	20	30	20	30	20
(1,3)	70	50	70	50	70	50	80	40	50	50	50	50
(2,1)	60	80	30	80	50	80	70	90	70	90	70	90
(2,2)	90	50	90	50	90	50	70	60	90	50	90	50
(2,3)	20	20	30	20	30	20	70	30	20	20	20	20
(3,1)	10	40	10	40	10	40	20	60	20	40	20	40
(3,2)	50	70	60	70	60	70	70	80	70	70	70	70
(3,3)	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0

注、停止回数損失(1)は不通時に限る場合
停止回数損失(2)は同数を指す場合

行所要時間損失および待ち時間に対するオフセットパターンがほとんど一致していることに気づく。ここではオフセットパターン設定のために、DPという数学的手法の適用を行っているわけであるが、一見、そうした数学的な方法を使い得る前提条件として損失関数 $g(D, \theta)$ がかなりの厳密性、安定性をもって決められる必要があるように見える。しかしながら、上のようなことからしても、損失関数形がある程度異なっても全体的制御の場合のオフセットパターンはかなり安定する可能性があり、損失関数形についてそれほど神経質になる必要はないことがわかる。つまり、オフセットパターンに

影響するのは損失の相対的な大きさだけであるからである。

いままでに述べたあらゆるケースについて、その損失値、相対的な大きさ（二方通行ランダムパターンでの損失値を100とする）および計算に要した時間をまとめておくと表-5.2.5(a)～表-5.2.5(d)のようになる。

以上、基本的な3つの制御方式について、計算例をとおして交通損失値の増減比較を行なったが、上に記した数値自身は対象街路網の道路条件、交通条件によって変化するものであるからその程度意味のあるものではない。しかしながら、路線系統制御によつては、系統制御の対象とならない路線に対してもオフセット設定に関する配慮をしない限り、思った程度の効果を期待できないこと、その意味では路線系統制御を基盤とした制御を行なうのがあればツリー形成による系統制御が望ましいこと、路線系統制御あるいは最大ツリー系統制御では損失関数形によつて、得らるるオフセットパターンがある程度異なってくるのに対し、全体的制御ではかなり定まっていること、全体的制御によれば当然ながら最も大きい損失減少効果を期待できるが、損失関数を用いると計算時間が非常に多くなること、しかしながら関数形を用いなければ計算時間はそれほどかからなくなること、一方通行規制のもとでは、路線系統制御の場合はそれほど制御効果があからないおそれもあるが、最大ツリー系統制御および全体的制御では大きな効果を期待できること等の事実が明らかになったことは、1つの成果である。

5.3 制御システムの構成

5.3.1 サブエリアの形成と制御方式

表-5.2.5 各種制御方式の損失・計算時間比較

(a)

制御方式	損失項目 通行システム	速度損失		
		損失値	相対値	計算時間 (秒)
ランダムバターン (平均値)	二方通行	24,181	100	4
	一方通行	23,941	99.0	3
路線系統	二方通行	22,610	93.5	2
	一方通行	17,484	72.3	2
最大ツリー	二方通行	16,561	68.5	6
	一方通行	8,950	37.0	6
全体的最適	二方通行	13,737	56.8	344
	一方通行	5,973	24.7	366

(c)

制御方式	損失項目 通行システム	待ち時間損失		
		損失値 (秒)	相対値	計算時間 (秒)
ランダムバターン (平均値)	二方通行	53,055	100	3
	一方通行	52,164	98.3	3
路線系統	二方通行	50,263	96.1	2
	一方通行	52,338	98.5	2
最大ツリー	二方通行	28,714	56.0	5
	一方通行	14,012	26.4	5
全体的最適	二方通行	23,713	42.8	336
	一方通行	6,735	12.7	360

(b)

制御方式	損失項目 通行システム	走行所要時間損失		
		損失値 (秒)	相対値	計算時間 (秒)
ランダムバターン (平均値)	二方通行	119,270	100	3
	一方通行	118,367	99.2	3
路線系統	二方通行	118,526	99.4	2
	一方通行	157,222	131.8	2
最大ツリー	二方通行	74,046	78.9	5
	一方通行	73,267	61.4	6
路線系統+ 全体的制御	二方通行	92,023	77.2	7
	一方通行	73,267	61.4	10
全体的最適	二方通行	85,141	71.4	340
	一方通行	64,527	54.1	364

(d)

制御方式	損失項目 通行システム	停止回数損失		
		損失値 (回)	相対値	計算時間 (秒)
ランダムバターン (平均値)	二方通行	913	100	3
	一方通行	794	97.7	3
路線系統	二方通行	591	72.7	4
	一方通行	608	74.8	4
最大ツリー	二方通行	464	57.1	4
	一方通行	136	16.7	4
全体的最適 (停止回数)	二方通行	455	56.0	384
	一方通行	178	21.9	371
全体的最適 (同数制式)	二方通行	456	56.1	54
	一方通行	121	14.9	71

面制御の対象となる街路網が比較的大きい場合には、いままで述べてきた制御方式のうち1つの制御方式を採用して、共通周期および各交差点ごとにとえらんだスプリントの条件下で、オフセットパターンを設定するという方法は必ずしも効率的ではない。なぜならば、対象街路網は部分によってその交通状態、道路状態を異にするのが一般的であるからである。すなわち、交通が比較的閑散な部分があれば、かなり混雑している部分あるいはその中間の部分もあるであろうし、また、道路構造の不良、バス停留所あるいはタクシーの発車停車等の原因で、渋滞をきたしやすい部分、交通の流れに明確な方向性が見られる部分などもあるであろう。第2章においても検討したように、周期長と交通損失の関係は一方が増加すれば他方も増加するという関係にあるから、上のような条件の異なる各部分に対しては共通の周期長を与えるよりも、おのおのの部分ごとに最も望ましい周期を設定した方が制御効率の向上を期待できる可能性があるのである。

このようなことから、一般によくいわれることであるが、まず対象街路網をいくつかの部分に分けて制御するという考え方がでてくる。この制御のために分けられた部分をサブエリアと称することにする。サブエリアのとり方としては、周期長の比較、交通調査あるいは担当技術官の経験的判断等をおして、ある場合には路線を、ある場合には数個の交差点を含む街路区間を、さらには単独交差点あるいはループを含む網をと適当にとればよいであろう。そしておのおののサブエリアにおける制御方式は、種々の調査・実験をおして、かつハートウェアとの関連を考えると、前章までに述べてきた方式の中から最も適切であると判断される制御方式を採用

することによればよいであろう。

たとえば、そのサブエリアが1つの路線で、交通の流れに方向性があれば、路線系統制御方式を採ればよいであろうし、そうした路線が何本か交錯する場合には、ツリー形成による制御が望ましいであろう。また、交通の流れにあまり方向性がない2次元的な広がりをもったエリアに対しては、ループの最適化を基盤とした制御方式を採ることも考えられるし、それが制御パターン設定のための計算時間の制約から不可能であればツリー形成制御によることもできよう。さらに、対象サブエリア内に、長さの短い街路区間等、待ち行列長との関係で重要な区間があれば、そこには優先的に有利なオフセットを設定したり、待ち行列長を考慮し、車群の再編成を収めたオフセット設定法を適用したりするなどの方法を講ずる必要がある。多差路交差点が1つのサブエリアを構成する場合には、H.N. Yagoda の他⁶⁰⁾あるいは S. Yagili⁶¹⁾ などの方法によって現示パターンを決定したり、自動感応の機能を十分に取り入れた信号現示システムをつくらればよい。

このようなサブエリアは、一般的には1日中固定しておく必要はなく、交通状態の変化に応じて適宜、分離統合させればよい。その判断の資料となるものは、周期の大きさが最も基本的であろう。なぜならば、再三述べるようにオフセット制御の大前提として周期の統一ということがあるからである。

サブエリアが地形的観点からみて、明らかに固定しておいた方がよいと判断される場合、それらのサブエリア相互間で周期の不統一から生ずる混乱を防ぐために、たとえば自動感応式信号機をサブエリアとサブエリアの間に挿入して、ショックアブソーバーとしての機能をもたせるという方法が考え

らねよう。

5.3.2 制御モード

交通状態は時間の経過とともに変化してゆくことは周知のとおりである。因みに、大阪市での観測資料⁶²⁾を示すと図-5.3.1のとおりである。すなわち、朝方の7時以前あるいは夜の9時以降は比較的閑散で、中間の午前10時から午後6時頃までは定常的に多い交通需要があり、その中間時は漸増あるいは漸減の非定常流になるというのが一般的な交通量のパターンである。

このようなことからすれば、制御パターンあるいは制御方式は、時間的に変化させてゆく必要があることは明らかであろう。このような時間的に変化させる制御パターンまたは制御方式を制御モードとよぶが、ここではこのことについて、従来からの考え方も含めて、若干述べておく。

(1) 閑散時の制御方式

早朝あるいは夜間の閑散時（および中間でもそれに該当する場合）における制御は、街路区間相互の交通損失の独立性が成立しないため、交通損失を制御規準として用いることは不利となるので、従来からもいわれられているように路線系統制御を基盤とし、スループントを評価規準とした制御方式を採用するのが好ましい。あるいは、周期長が可反的に短くなるように、すべての信号機に自動感応の機能をもたせるという方法も考えられよう。

(2) 非定常時の制御方式

交通は見方によれば1日中非定常とも考えられる流れ方をしているが、ここではとくに朝方あるいは夕方の変化の著しい時間帯における制御方式について考えてみる。

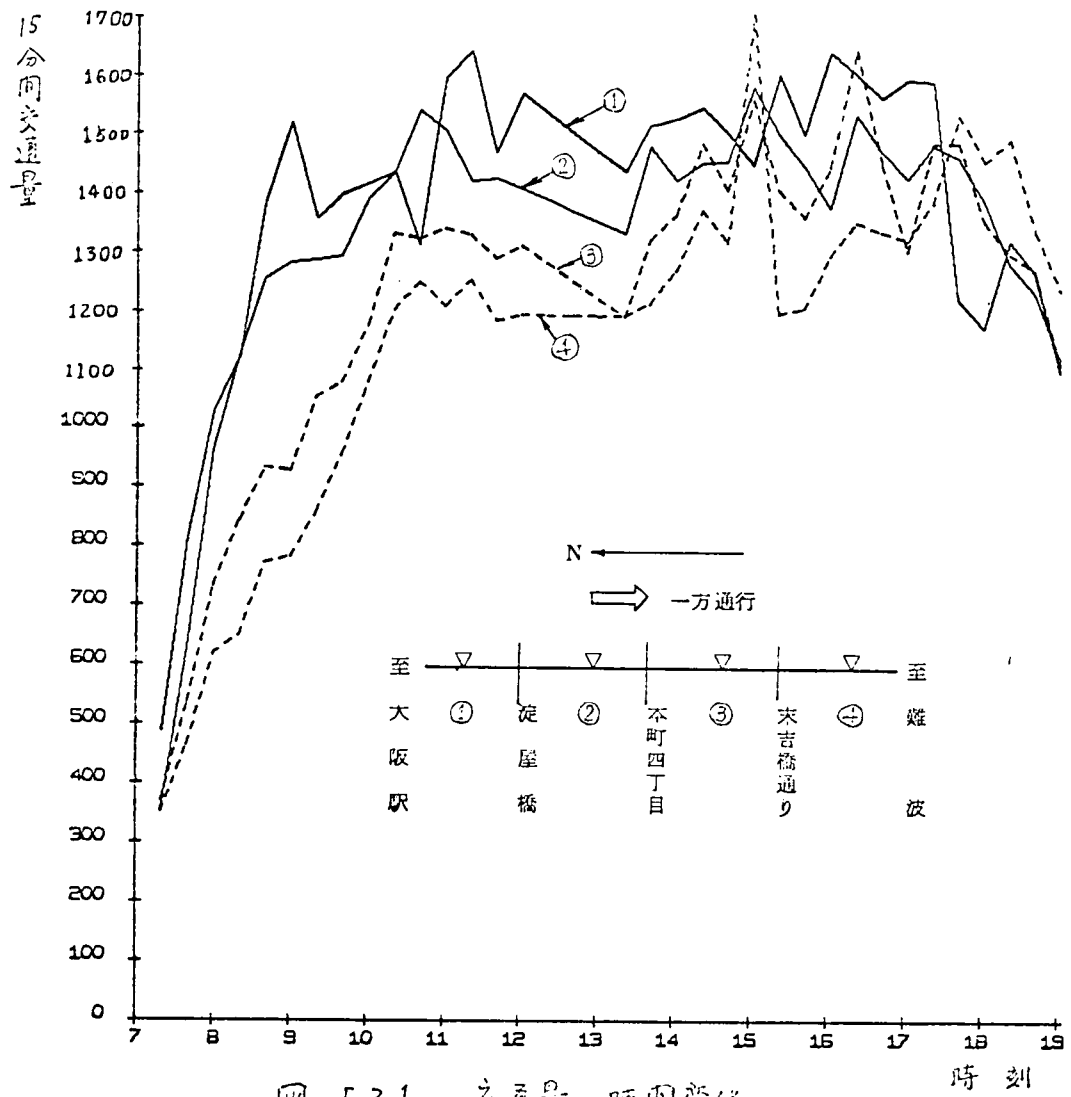


図-5.3.1 交通量の時間変化

まず、交通需要が時間とともに増加する朝夕の場合であるが、図-5.3.1を見てもわかるように、この時間帯ではわずか数時間の間に交通量は3倍近くなっている。理想的にはこのような交通需要の時間変化に伴なって刻々に最適な周期、スプリットおよびオフセットを与えればよいわけであるが、制御パターン変更に伴なう交通混乱を少なくするためには、1つのパターンを他のパターンに移行させるのに10分間前後の時間を要するという制約条件がある。したがって、そのようなことは現実的に不可能といえる。

このようなことから、1つの考え方として、朝夕非定常時の時間帯を1時間程度の時間帯に分け、その各時間帯で当該時間帯の最大交通需要を対象とした制御パターンを与えろという方法がある。

他の1つの考え方として、周期のみを非定常時最大の交通需要にあわせて設定し、スプリットあるいはオフセットを1時間あるいは30分ごとに変えるという方法も考えられる。もちろん、交通需要の増え方が各サブエリアの方向によって多少異ならなければ、スプリットあるいはオフセットのパターンはかなり安定して、その変更を行なうことが必ずしも必要でない。

夕方から夜にかけての交通需要漸減時の制御は、朝夕非定常時の制御に比べれば楽観的である。なぜならば、上に述べたような方法をそのまま適用するとした場合、交通需要は時間とともに減少してゆくわけであるから、交通需要が交差点容量を上回ることから生ずる渋滞発生の恐れがないからである。

上述の方法で用いる交通需要は、予測的なものでなければ、

制御パターン変更には、ある時間長が必要であることからしても、技術的に制御を行なうことは不可能であるが、予測の方法としては前日同時間あるいは前週同曜日同時間の交通需要をそのまま用いるとか、若干修正を加えたものを用いるなどの方法をとればよい。

いずれにしても、上に述べたような方法は便宜的な方法であって、こうした非定常時の制御については将来の研究発展に期待するところである。

(3) 昼間定常時の制御方式

図-5.3.1からもわかるとおり、昼間の交通需要は大局的にみて定常である。時間帯に分けるとすれば、午前10時～12時のピーク時、12時～午後2時の比較的交通需要が少なくなる時間、午後2時～4時の中程度の交通需要がある時間および午後4時～6時のピーク時の4つ程度が考えられるが、この決め方については対象地域の特徴を考慮し、交通調査のうらづけをもったものでなければならない。

制御方式は、まず周期およびスプリットについては平均予測交通需要にあわせるよりも、過去の資料解析から、超過確率がある値以下になるような交通需要を対象として設定し、交差点容量以上の交通需要が集中して交通渋滞を惹起し、それが原因となってさらに広範囲に交通渋滞が広がってゆくという危険性を小さくしなければならぬ。オフセットについては、それが直接交差点容量につながるものではないし、また、前節の結果からして交通損失関数の形の変化に対してはパターンの的に比較的安定しているので、既に述べた方法を適宜採用して、その設定を行なえばよい。

(4) 渋滞時の制御方式

渋滞の定義として明確なものはないが、ここでは交差点で車が2回待ち以上せざるを得なくなった状態と指すものとする。それは予想以上の交通需要がその交差点に集中するために交差点容量に不足を来たことから生ずると考えられる。したがって、それを解消するためには、端的にはその交差点の容量を増やすべく周期的ないしはスプリットを変化させればよいわけであるが、その交差点単独の変更は隣接交差点との間のバランスをくずすことになるので、影響範囲全体にわたって、容量の整合性の条件を考慮しつつ、制御パラメーターを変えることが望ましい。

上の方法では、よほど適切に制御パラメーターの変更を行われない限り、渋滞を他の交差点に移行させるだけという皮肉な結果になりかねない。そこで考えられる別の方法として、直接的に渋滞を解消するのではなく、それがさらに深刻化することを防止し、ひいてはその渋滞を緩和解消するべく、その交差点に集中してくる交通を上流側の交差点で、適当に抑えるという方法がある。もちろん、抑えられた交差点では当然の帰結として渋滞発生を招くが、その位置を都心から若干離れた線形的な道路に選ぶなどすれば、渋滞は線形的に伸びるだけで済むことになり、都心内部で渋滞を放置した場合の面的な発展に比べて、被害程度は少なくなると思われる。つまり、網全体として容量が需要を下回った場合には、渋滞はどこかにしわ寄せしなければならぬという判断である。

もちろん、そのような抑制措置と平行して、人的あるいは機器的な手段を導入して適当な迂回指示を与えることも必要となつてこようが、それがあまりにも不用意に行なわれると迂回交通による渋滞発生という事態を招く恐れもあるので十

分な注意が要求される。

渋滞が結果的にみて、すぐに自律解消する程度のものであった場合には、上に述べたような措置を講ずることはいずれも非効率な結果につながるので、いかなる時点でそうして制御に踏み込むかについての十分な研究の積みかさねが望まれる。

(5) 非常時の制御方式

火事、交通事故あるいは怪し物など非日常的なことがあった場合には、通常交通渋滞を惹起することが多いが、そうした場合の制御は機器的手段もとることながら、人的手段を大いに活用して、迂回指示、上流側における交通制御など(4)に準じた方法を実行すればよい。かかる場合、いかなる方法によっても全域的交通渋滞を回避できない可能性もあるが、そのような場合には、交通を円滑に流すという制御は諦めざるを得ないわけで、人的手段によって渋滞の深刻化を防止することに注力することが肝要となる。

5.3.3 制御パターンの継続時間と変更方法

周期、スプリットおよびオフセットを各交差点に与えた場合に、その制御パターンをいかなる時間長さの間保持すべきかという問題があるが、これについては交通需要の予測手法が過去の需要パターンの修正程度でしかないという現手段では、あまり厳密な議論をしても意味がないので、30分ないし2時間を目安として、交通調査資料を手掛りに適当に決めるという方法によらざるを得ないであろう。したがって、そうした場合に大切なことは交差点容量に直接関連する周期およびスプリットをある程度余裕をもって設定することである。そのための具体的な方法としては過去の交通需要解析から、

それら制御パラメーターの設定から決まる交差点容量を上回る交通需要が、その交差点に集中する確率が一定水平以下になるようにするという方法があろう。

つぎに、制御パターンの変更方法であるが、以下においては各制御パラメーター別に若干の考察を行なう。

〔周期の変更方法〕

周期を C から C' に変更する方法は、 ΔC 分のステップ幅で達成する以外に方法はないと思われるが、 ΔC を何秒にしたらよいかという問題は調査実験をとおして判断すべきであらう。

ところで、周期が C' に変更された時点で果してスプリットあるいはオフセットは元のままに保たれるであらうか。

いま周期が C であったときの交差点 (配れ) の水平方向リンクに対する青信号比率を S^{blue} とすると、まずスプリットについては $(C' - C)$ なる量を $S^{blue} \cdot (C' - C)$ と $(1 - S^{blue}) \cdot (C' - C)$ に分けて、それぞれ青信号あるいは赤信号の長さを増減するようにすれば、結果としてスプリットは不変に保たれる。

つぎにオフセットであるが、これは結論から言えば、スプリットの変化を顧みないかぎり不変に保つことは可能である。すなわち、 $(C' - C)$ を適当な割合 γ で分け、 $\gamma \cdot (C' - C)$ を水平方向の青時間延長に、 $(1 - \gamma) \cdot (C' - C)$ を赤時間延長に割り当てれば、相対オフセットは何らの変化も受けないからである。特別な場合として、全交差点同一のスプリットである場合を考えると、 γ として共通スプリットの値を選ぶことによって、スプリットも不変のまま保持できる。

〔スプリットの変更方法〕

スプリットの変更方法も，周期と同様に餘餘に変化させる方法を採れば問題なく行なうことができる。しかしながら，スプリット変更は必ずオフセットの変化を伴なうので，好ましい方法としては，このオフセットの変化による犠牲が最も少ない形で行なう方法が1つ考えられよう。すなわち，いま交差点 (m, n) 単独でスプリットを $S^{m,n}$ から $S^{m,n'} (S^{m,n} < S^{m,n'})$ に移行させるとしたとき，代表的な変更方法としては，図-5.3.2に示したような2つの場合が考えられる。

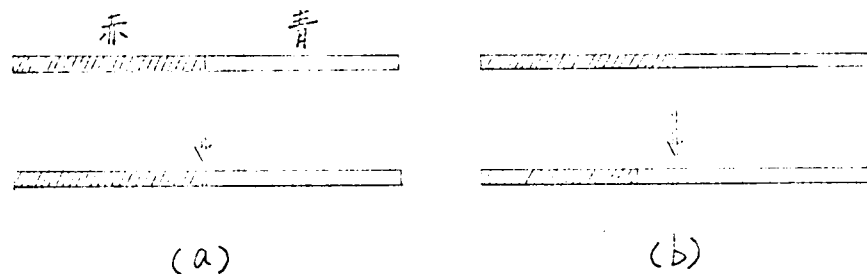


図-5.3.2 スプリット変更の2つの代表例

(a)の場合は水平方向の青時間延長によってスプリットを変えており，水平方向のオフセットは変わらないが，垂直方向のオフセットは $(S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C$ だけ変化する。逆に，(b)の場合は，水平方向の赤時間の“早切り”で垂直方向のオフセットは変わらないが，水平方向のオフセットは変化する。しかしながら，一般的なスプリット変更方法としては，これら2つの場合の中間的な場合であるから，オフセットは両方向ともに変化すると考えられる。そこで，いま水平方向のオフセット変化量を $r \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C$ ，垂直方向のオフセット変化量を $(1-r) \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C$ とすると，スプリット変更完了時点で，交差点 (m, n) にインシデントなリンクで発生する損失合計 $S(r)$ は

$$\begin{aligned}
S(r) = & \left\{ g_1^{m,n-1} \left(\theta^{m,n-1} + r \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_1^{m,n-1}}{\theta^{m,n-1}} \right) + g_2^{m,n-1} \left(\theta^{m,n-1} \right. \right. \\
& \left. \left. + r \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_2^{m,n-1}}{\theta^{m,n-1}} \right) \right\} + \left\{ g_1^{m,n} \left(\theta^{m,n} - r \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot C, \frac{g_1^{m,n}}{\theta^{m,n}} \right) + g_2^{m,n} \left(\theta^{m,n} - r \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_2^{m,n}}{\theta^{m,n}} \right) \right\} + \\
& \left\{ g_1^{m-1,n} \left(\theta^{m-1,n} - (1-r) \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_1^{m-1,n}}{\theta^{m-1,n}} \right) + g_2^{m-1,n} \right. \\
& \left. \left(\theta^{m-1,n} - (1-r) \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_2^{m-1,n}}{\theta^{m-1,n}} \right) \right\} + \left\{ g_1^{m,n} \left(\theta^{m,n} \right. \right. \\
& \left. \left. + (1-r) \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_1^{m,n}}{\theta^{m,n}} \right) + g_2^{m,n} \left(\theta^{m,n} + \right. \right. \\
& \left. \left. (1-r) \cdot (S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C, \frac{g_2^{m,n}}{\theta^{m,n}} \right) \right\}
\end{aligned}$$

のように表わされる。したがって、この $S(r)$ が最小となるような r をみいだし、その r を用いて $(S^{m,n'} - S^{m,n}) \cdot C$ の割り振りを行なえばよいことになる。

ところで、全交差点のスプリットを一せいに変更する場合には、上のような簡単な方法ではやれないので、このようなときにはむしろスプリットの変更すべき値を与えた条件で、改めて最適オフセットパターンを決め直し、一オミパラメータを変更した後で他方のパラメータを変更するなどの方法を採用がよい。

〔オフセットの変更方法〕

いま交差点 (m, n) の絶対オフセットを $\xi^{m,n}$ から $\xi^{m,n'}$ に変更させる場合を考えよう ($m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$)。変更方法は原理的には $\xi^{m,n}$ と $\xi^{m,n'}$ の間を $\Delta \xi$ ずつ

徐々に変化させてゆくという方法によればよいが、より迅速にパターン変更を完了したいという要求があるので、 $\xi^{m,n}$ と $\xi^{m,n'}$ の差はできるだけ少ない方が好都合であろう。ところが、全交差点に同一のオフセット量を付加しても、相対オフセットパターンとしては変わらないという事実がある。したがって、

$$\min_e \left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\xi^{m,n'} + e - \xi^{m,n})^2 \right]$$

なる e を見付け、変更すべきオフセットパターンを新たに $\xi^{m,n'} + e$ として決の直し、この状態で徐々に $\Delta \xi$ ずつ変更させてゆく方法を採ればよい。 $\Delta \xi$ の合理的な値については実験をとおして決めればよいが、栗本の場合では周期の8分の一を1周期あたりの最大変更幅としている。

〔複数の制御パラメータの同時変更方法〕

3つの制御パラメータのうち、2個あるいは3個を同時に変える場合にはどのようにして移行完遂を計ればよいかに
ついて最後に考えてみることにする。

まず、周期とスプリットを同時に変える場合であるが、先にも説明したように、これは必ずずオフセットの変化を伴なうので、このことによる犠牲を最小にしようとするのは、けっきょく周期、スプリットの変更値を与えた条件で最適オフセットを求めることと同意となる。したがって、その変更方法について考察すればよいわけであるが、結論的に言っても3つの制御量をまったく同時に、矛盾なくかつむだなく変更することはできないので、周期およびオフセットを同時に変え、最後にスプリットを変える方法、周期をまず変え、ついでオフセット、スプリットを変える方法、3つの制御量を1つづ

順次変えてゆく方法等によらざるを得ない。

このうち、周期およびオフセットを同時に変える方法であるが、これは周期の変更方法のところでも述べたことにより明らかに可能である。

つぎに、スプリットとオフセットの同時変更であるが、たとえば、いまある交差点のオフセット値を小さくする場合（青信号開始時刻をいまより早くする）を考えると、これは信号の毎周期に△秒ずつの赤信号の早切りを実行することによって達成するわけであるから、赤信号を長くするようなスプリット変更には矛盾することとなる。しかしながら、かかる場合においても青信号の早切りを同時平行的に行なうなどの手段を講ずれば、オフセットを小さくしつつ、赤信号を長くすることは技術的にはできるわけで、ある程度の無理、負担を覚悟すればこれら2つの制御パラメータの同時変更は可能であると言ってもよいであろう。しかしながら、こうした方法がオフセットをまず変え、その後でスプリットを移行させるという方法に比べて効率的であるかどうかは検討の余地が残っている。

最後に3つの制御量を1つつつ変更する方法であるが、これは技術的には問題はないであろう。しかしながら、どの制御パラメータを最初に変えた方が最も効率的であるかなど制御パラメータの取り挙げ方の順位の問題については、交通に与える影響も考慮して今後とも検討すべき点が多い。

5.3.4 交通規制との一体化

いままでに述べてきた制御は、あくまでも信号制御を中心にしたものであるが、それは交通規制システムとの一体化によってさらに効果を発揮する。

すなわち、ある交差点において右折車あるいは左折車が異常に多く、そのために容量が低下してその交差点での交通損失が結果的に増えている場合であれば、右折禁止あるいは左折禁止等の交通規制を敷くことによって、交通損失は大幅に減少するであろうし、またそれに伴って制御効果も向上することも期待できよう。

また、タクシー等の駐停車あるいは小街路からの車の出入りが頻繁なために混雑をきたしやすい街路区間では、その区間において駐停車規制あるいは小街路からの車の出入り規制（いずれも時間帯によって変えることは可能）なる交通規制の実施の可能性についてもあわせ考えることは重要である。

バス停留所による交通流の攪乱などは、マストランシット優先の考え方ともあいまって、専用車線の設置という措置をも、その対応策の中に含めて考えるべきであろう。

オフセット効果に関係の深い車の速度、いわゆる系統速度は、速度規制という交通規制手段によって変え得ることは言うまでもないわけで、交通規制システムと一体化した信号制御システムを考える際には、この系統速度は制御変数として取り扱ってもよいことになる。

一方通行規制は、一般に交差点容量の増大をもたらすし、オフセットの系統化を容易にするので、信号制御システムと一体化すべき交通規制策としては最も重要なものの一つである。因みに、交通量配分が机上のものであるという条件はあっても、前節の計算例では、一方通行規制による制御効果の顕著なる向上が定量的に見られた。

5.3.2の渋滞時の制御方式のところ述べたような、都心への車の流入抑制を、信号機等の機器的手段によらずに、許

可制などの行制的手段によって行なった場合、それは交通規制の範疇に入ってくることになる。一定の限られた道路スペースを、その容量以上の車が同時的に使うことはできないので、こうした車の都心部流入抑制方策は、車の排気ガスによる大気汚染問題とも絡んで、将来はさらに必要性の高いものとなってゆくであろう。

こうした考え方をさらにおし進めてゆくと、究極的には交通発生抑制による交通制御の考え方につながってゆく。すなわち、交通混雑の基本的な原因は、個々の自動車相互にまったく何の関連もなく発生することから、時刻により街路あるいは街路網の容量以上に車の交通需要がすすることにあると考えられる。かかる場合に、交通信号機を始めとするいかなる機器的手段を講じても、そうした交通需要を前掲とする限りにおいては、交通混雑は不可避であって、根本的な混雑防止策は全体的な交通需要を減少させることにあると思われる。交通需要を減少させるということは、すなわち全体の交通のうちその何割かの交通の発生を抑制することであるから、これは交通規制的な考え方を導入した交通制御ともいうべきものである。こうした交通発生抑制制御が行なわれている街路網においては、信号制御が有効に作動する条件を備えていることになるのである。

以下では、この交通発生抑制制御の理論について少し詳細に述べておくことにする。

交通発生を抑制する交通制御の目的は、対象街路網のすべての街路区間に対する交通需要が、その街路区間の容量を越えないようにすることにあるが、そのための抑制方法は理論的には無数にあると考えられる。したがって、その中から最

も合理的な抑制方法を選びだすことを考えねばならない。ここでは、この合理性の規準として、抑制量最小、逆に言えば、発生量最大の規準を採用することにするが、これは交通発生抑制は、一般に車による交通需要者の自由を束縛することになるので、そうしたことはでき得る限り少ない方がよいという判断による。以下、この規準によって、都市内高速道路の流入制御の理論⁶³⁾を適用しつつ、理論展開を試みる。

対象街路網で適当なゾーン設定が行なわれるとき、各ODペアーごとにルートが幾本か定っており、そこへ配分率がわかっているものと仮定する。すなわち、いま図-5.3.3に示したような街路網で、各交差点を交通の発生吸収地点とするとき、たとえば交差点*i*から交差点*j*へ向かう交通のルートが、ルート1、ルート2のよちに2本あり、それらのルートへの配分率が P_{ij}^1, P_{ij}^2 ($P_{ij}^1 + P_{ij}^2 = 1$) のように与えられているということである。

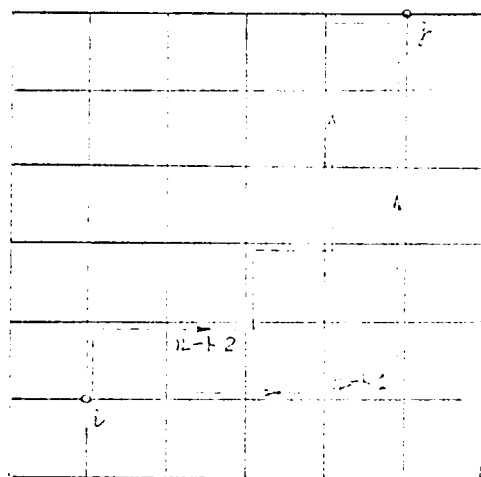


図-5.3.3 $i \rightarrow j$ 交通のルート

さて、いま

T_{ij} ; ゾーン*i*とゾーン*j*間のOD交通量 ($i, j = 1, 2, \dots, N$; N ; ゾーン数)

K ; OD間のルート数。各ODごとにルート数は異なってもよいが、定式化の都合上一定としておく。

P_{ij} ; ゾーン*i*で発生した交通のうちゾーン*j*へゆく割合。

p_{ij}^k ; ゾーン*i*からゾーン*j*へゆく交通のうち第*k*目のル

ートを通る交通の割合

C_l ; 対象街路網の各リンク（街路区間）に番号を付するものとしたとき，第 l 番目リンクの容量（ $l=1, 2, \dots, J$ ；リンク総数）

なる記号を定義する。また， $i \rightarrow j$ の OD 交通に対するルートマトリックス R_{ij} を

$$R_{ij} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{リンク} \\ \text{ルート1} \\ \text{ルート2} \\ \vdots \\ \text{ルートK} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & J \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

のように与える。ここに，いま r_{ij}^{kl} を上の行列の (k, l) 要素とすると

$r_{ij}^{kl} = 1$; $i \rightarrow j$ の OD 交通に対する k 番目ルートに，第 l 番目リンクが含まれる場合

$r_{ij}^{kl} = 0$; $i \rightarrow j$ の OD 交通に対する k 番目ルートに，第 l 番目リンクが含まれない場合

なるものとする。なお， $i \rightarrow j$ の OD 交通に対するルートが K' 本（ $K' < K$ ）しかない場合には $K'+1 \sim K$ までのルートに対応する要素をすべて 0 とすればよい。

ここで， R_{ij} の第 1 行に p_{ij}^1 を，第 2 行に p_{ij}^2 を，一般に第 k 行に p_{ij}^k を乗じたマトリックスを考え，これを \bar{R}_{ij} と表わすと，このマトリックスの列和は $i \rightarrow j$ に単位交通量が生じた場合の，その列に対応するリンクに配分される交通量と解される。したがって， $i \rightarrow j$ 交通量が $x_i p_{ij}^k$ の場合には，ちょうどその値倍となるはずである。ここに， x_i はゾーン i での発生交通量とする。よって，

$$\sum_i \sum_j x_i p_{ij}^k \bar{R}_{ij} = A \quad (5.3.1)$$

とにおいて、これに K 個の要素から成る単位ベクトル $e = (1, 1, \dots, 1)$ を左側から乗ずれば、その結果得られる J 個の要素から成る行ベクトルの各要素は、対応するリンクを流れる交通量の総和となる。

ここで、

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_J)$$

なるリンクの容量ベクトルを考えると、各リンクの交通量が容量を上回らないという条件は

$$eA \leq C \quad (5.3.2)$$

と簡単に表わすことができる。

また、

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$$

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_N)$$

$$\text{ただし, } T_i = \sum_j T_{ij}$$

とすると、当然の関係として

$$X \leq T \quad (5.3.3)$$

$$X \geq 0 \quad (5.3.4)$$

が成立する。

式(5.3.2)～式(5.3.4)の条件のもとで、発生交通量をできる限り許すという観点から、対象街路網の総発生交通量

$$F = \sum_i x_i \quad (5.3.5)$$

を最大にするのである。

このような交通発生の抑制により，各リンクの交通量が容量を上回ることはなくなり，円滑な信号制御による交通処理が可能となる．なお，上に示した問題は LP の代表的問題である．こうした抑制制御を時間帯ごとに行なう場合には，抑制された交通量 ($T_i - x_i$) をその時間帯の T_i に加えたり，優先交通を適当に決めるなどして，発生を抑制されるゾーンでは常に抑制され，逆に抑制されないところでは常に抑制されないという不平等が発生しないようにしなければならない。

ところで，上の抑制方式によると理論的には各発生ゾーンすべてが何割かずつ発生を抑制させることになり，技術的にむずかしい問題が生じてくる可能性がある．そこで，つぎに各ゾーンの交通発生を全面的に認めるかあるいは逆に全面的に認めないかという，いわゆる all or nothing 方式の場合について考えてみる．そのために，

m_i ; 0 または 1 の変数. ゾーン i が発生を認めない場合 0, 認める場合 1

なる変数を定義すると，まず，式 (5.3.1) に対応するものとして

$$\sum_i \sum_j m_i T_i p_{ij} \bar{R}_{ij}^* = A'$$

が得られるから，式 (5.3.2) に対応して

$$e A' \leq C$$

なる条件式をつくることができる．また，目的関数 F' は

$$F' = \sum_i m_i T_i$$

となる。したがって、与えられた問題は n を变数とする整数計画法の問題として解くことができる。

ルートをあらかじめ与えない場合には、各交差点の右左折率を用いたマルコフ連鎖による理論構成が可能となる。これも、また LP によって解く問題となる。⁶³⁾

上述のような理論にしたがった具体的な制御方法としては、設定されたゾーンの内部およびその出入するすべての細街路、ならびに駐車場に信号機あるいは表示板をつけ、それらの表示を制御理論にしたがって作動させる方法、ラジオ、テレビ等の情報網を利用する方法、鉄道の踏切のような遮断機方式あるいは人海戦術による監視など種々考えられるが、技術的にはむづかしい問題が多多あると考えられ、実現性は将来に問われる。

いずれにしても、何らかの方法によって対象街路網に集中する交通需要を抑えるということは、昨今の交通状況を考えれば必要になってくることは明らかであり、こうしたことも先に述べた種種の交通規制策とあわせて考えて、信号制御と一体化した形で、都市に集中する自動車交通をいかに処理してゆくかについて総合的に考える必要がある。

5.4 結語

9個の交差点から成る格子状街路網を対象として、第2章で得られた損失関数を用いることによって、数値計算を行ない、第3章および第4章を検討したいくつかの制御方式について、比較検討を行なったが、本章での結果が、そのまま一般的な街路網あるいは交通条件に対しても成立するものではない。すなわち、計算対象とした街路網は特定のものであり、

かつ交通パターンが単一で、右左折交通がないことを前提としているからである。

しかしながら、単なるオフセット設定によって、交通損失が意外と思われる大きさで変化すること、配分交通量の多化が無視できるとした場合には、街路網から適当に選ばれた路線に対して、相互に独立して路線系統制御を行なっても、網全体としての評価ではあまり大きい効果を期待できないこと、その意味で路線系統制御を基盤とした制御としては、ツリー形成による制御が望ましいこと、ループの最適化を基盤とした全体的制御では、損失関数の形がそれほど敏感にはオフセットパターンに影響しないこと、および路線系統制御は別として、ツリー形成制御およびループの最適化を基盤とした制御では、一方通行規制は顕著な制御効果をもたらすことなどが明らかになった。

今後の研究として、街路網および交通条件を種種変えたものについて、同様の検討をしてみることに、対象街路網に車を流すシミュレーションモデルを作成し、それによって制御効果を確かめること、およびできれば、実際の街路網で実験を行なってみることなどが挙げられる。

制御システムの構成については、従来の考え方をふまえ、若干の考察を行なったが、サブエリアの形成方法、各サブエリアにおける制御方式の採り方、あるいは制御パターンの継続時間の決め方およびその変更方法等については、実際の街路網における十分な調査資料の解析をとおして、今後とも検討が加えてゆかなければならない。

また、交通規制と信号制御との一体化は、一定の街路空間に、その容量を上回る交通需要が集中している昨今の大都

市都心部の交通状態を考えると、信号制御システムの構成上、不可欠の要件であると思われ、これも将来に残された重要な課題の一つとして、さらに研究してゆく必要がある。

第6章 結論

本研究は、街路網の信号制御における、オフセット最適化の問題を取り扱ったもので、制御の評価規準としての交通損失とオフセットの関係の検討、路線、ツリーおよびグループを含む網を対象とした、オフセットパターンの最適設定法についての考察、およびそれらのオフセット設定法の比較検討という、3つの部分から構成される。以下、本研究をとおして明らかとなった事項を経験として述べる。

第1章では、まず、本研究の主題であるオフセット最適化を含め、信号最適化の意味を述べた。すなわち、信号機が少ない時点では、信号の最適化は各交差点ごとに、独立して行なえばよいが、大都市街路網のように、ほとんどの交差点に信号機が設置されるようになった時点では、ある1つの交差点に流入する交通の流水が、隣接交差点での信号制御に影響されるようになるので、これら交差点相互間で、何らかの関連をもたせて信号制御を行なった方が効率的となる。これがいわゆる系統制御の誕生で、その具体的内容は、信号機の周期、スプリットおよびオフセットの設定であるから、これら制御パラメーターの最適設定がとりもなおさず信号の最適化であることを述べた。3つの制御パラメーターのうち、オフセットは各信号機の青信号のタイミングを意味するが、その合理的設定は系統制御の本質的部分を占めていることから、本研究はこの問題に焦点を絞って考察を行なうこととした。

第2章では、信号制御の評価規準の種類を列挙し、そのうちの交通損失については、数式モデルとシミュレーションの両面から、それがオフセット変化によって、いかなる影響を受けるかを調べた。まず、1つの街路区間内で発生する交通

損失は、停止回数という損失を除き、当刻区間に対応する相対オフセットの変化に対して、最大値および最小値を1つずつもって、余弦関数的に変化することがわかった。また、停止回数でみた交通損失は、ある領域のオフセットに対して、変化を来さない傾向があることがうかがえた。

さらに、1街路区間における交通損失の、隣接区間の相対オフセットによって受ける影響の度合いを調べた結果、1車線あたり約600台/時間以上の交通量に対しては、それほど影響を受けないことがわかった。つまり、その範囲に入る交通量については、街路区間相互の交通損失の独立性を仮定できるわけであり、このことはオフセットの最適設定の問題を飛躍的に容易ならしめるのである。実際の適用にあたってはこの仮定が成立するか否かを判断するために、現実の街路で実験を行なう必要がある。

第3章においては、路線系統制御を基盤とした制御、すなわち単一の路線を対象とした系統制御およびツリー状路線を対象とした系統制御における、オフセット設定の方法について述べた。

まず、路線を対象とした場合について、動的計画法を用いたスループット最大規準によるオフセット設定法を示した。この方法は、従来の方法に比べて計算量が極めて多いという欠点を有しているが、街路区間の系統速度を任意に変えたとしても計算可能であり、また、その区間速度自身を決定変数とすることができる構造を有している点に特徴をもつ。

つぎに、同じく路線を対象に、総交通損失最小の規準によるオフセット設定の方法について、街路区間相互の交通損失の独立性が成立することを前提とした場合には、各街路区間

ごとに、独立に最適化を実行すればよく、問題は極めて単純化されること、交通量がそれほど多くなく、1街路区間の発生損失が、隣接区間の相対オフセットにも影響をうけることを前提とした場合には、動的計画法あるいは離散型最大原理を導入することによって、オフセット設定を行なえることを示した。

また別に、上流側交差点から流出してきた車群が、下流側交差点を流出しつつある車群に追いつくという条件で、オフセット設定を図る方法を示したが、この方法は待ち行列長をモデルの中に内包しているので、交差点間が短い区間など、待ち行列長との関連で特別な条件を有している街路区間に対して、部分的に用いられる可能性がある。

ツリー状路線を対象とした場合については、街路網の各区間に対応するオフセットの制御効果量を交通損失で表わし、これによって、与えられた街路網から最も制御効果の大きいツリーを形成する方法と、そのツリーに対するオフセットパターン決定の方法について述べた。まず、街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合には、効果量の大きい街路区間から順次ツリーを構成するように選んでゆけば、それかとりし直さず最適ツリーを形成すること、また、オフセットパターンについても、各区間独立に最適化を行なうことによって、容易に決定できることが明らかになった。交通損失が隣接区間の相互オフセットにも影響されるとした場合には、動的計画法およびランダムサーチ法を用いることによって、近似的な最適ツリーの形成とそのツリーに対するオフセットパターン決定がなされることを示した。

第4章では、街路網にループの存在を認め、網全体での1

つの評価規準を最適にするオフセットパターン決定の方法について述べた。

まず、動的計画法を用いた網全体のスループット最大化の方法を示した。本方法は、各路線に対するスループットのウェイトづけを行なうことが可能であり、各街路区間の系統速度が異なる場合にも適用できるという点に特徴をもつが、計算量は極めて多くなるという欠点を有している。スループットの本質からすれば、実際の街路網に対しては、たとえ交通量が少ない場合であっても、こうした網全体でのスループット最大化を図るよりも、適当に選り出された何本かの路線に対して、スループット最大化を図った方がよいと思われる。

つぎに、網全体の交通損失最小の規準によるオフセットパターンの決定方法について、いくつかの手法を示した。まず、動的計画法の適用により、街路区間相互の交通損失の独立性を仮定した場合、隣接区間の影響を考えた場合、およびある特定の条件のもとでの、任意区間の影響を考えた場合のいずれの場合についても、最適オフセットパターンを決定することができるとを示し、街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合については、その方法が、ある街路区間のオフセットを一定範囲に限定しなければならない場合（たとえば、待ち行列長に制限がある場合）、損失関数が不連続な場合、あるいは路線にウェイトをつける場合など、種種の場合に対しても適用しうることを示した。

つぎに、街路区間相互の交通損失の独立性が成立するとした場合について、最適オフセットパターンの決定が、離散型最大原理、傾斜法およびラグランジュの未定乗数法を用いることによっても可能であることを示した。このうち、離散型

最大原理による方法は、計算時間が動的計画法よりも多くかかり、かつ、必ずしも損失最小に対応するオフセットパターンを与えない。傾斜法による方法は、計算時間が短いことから、比較的大きい街路網にも適用しうる可能性があるが、交通損失関数が凸関数でない限り、総損失の局小値に対応するオフセットパターンしか与え得ないので、実際の計算では、多くのランダムな初期値に対応して極小値を求め、その中の最小値を選ぶというような便宜的方法を講ずるか、損失関数を近似的に凸関数化することが必要となる。ラグランジュの未定乗数法による方法は、傾斜法の場合と同じく、損失関数を凸関数化することが、その適用のための前提となる。

第3章において述べた方法についても言えることであるが、上述のような方法が実際の街路網信号制御に適用されるためには、交通損失関数がある程度安定している必要があることから、対象街路網の交通量が多く、その流れが定常的で、かつ、いずれの交差点においても、容量を上回る交通需要がないこと等が前提となる。また、交通損失関数については、実験あるいはシミュレーションを十分に行ない、現実が発生する交通損失の特性を表現できるように、その関数形を決定する必要がある。

第5章においては、まず、小規模街路網を対象とし、第2章で求められた損失関数を用いて、実際に数値計算を行ない、第3章および第4章で考察したいくつかのオフセット制御方式を比較検討した。ここで得られた結果は、計算対象の街路網が小規模かつ特定のものであって、交通条件もまた特定な場合に限られていることから、必ずしも一般性をもつものではないが、単なるオフセット設定のいかんによって、交

通損失が極めて顕著に変化すること、配分交通量が制御によって影響されないという前提にたてば、路線系統制御を各路線ごとに独立に行なっても、網全体の交通損失という規準からは、あまり大きな効果が望めないこと、したがって、路線系統制御を基盤とした制御であれば、ツリー形成により、路線を相互に関連づけつつ系統制御を行なう方法を採った方が好ましいこと、ループの最適化を基盤とした全体的制御は、損失関数が安定している限りにおいては、最も少ない交通損失を与えることおよび路線系統制御あるいはツリー形成制御に比べて、損失関数形のオフセットパターンに及ぼす影響が少ないこと、一方通行規制のもとでは、ツリー形成制御およびループの最適化を基盤とした全体的制御は、二方通行の場合に比べて顕著な制御効果の向上を示すが、路線系統制御の場合には網全体の交通損失は必ずしも減少しないことなどがわかった。

最後に、制御システムの構成として、従来からいわれていることであるが、与えられた街路網の信号制御を行なおうとする場合には、その街路網を交通状態によっていくつかのサブエリアに分け、そのおのおのサブエリアに対して、適宜、以上に表示したような制御方式を採用すべきであることを述べた。すなわち、路線が主体となるサブエリアであって、かつ、交通の流れに方向性がある場合には、路線系統制御を採用すればよく、このような路線が何本か交錯してサブエリアを構成しているならば、ツリー形成による制御を行なえばよい。これに対し、交通の流れに顕著な方向性がなく、サブエリアを構成するどの街路も、同じような重要性をもっていると判断される場合には、ループの最適化を基盤とした制御方式の

適用を考えるか、計算時間の制約でそれが不可能であれば、ツリー形成による制御を行なうようにすればよいであろう。しかし、これは原則論であって、実際の街路網におけるサブエリアのとりおおよびそこでの制御方式については、当該街路網の道路条件および交通条件に関する調査資料を十分検討して判断すべきものと思われる。

その他、従来の考え方をもふまえて、制御モード、制御パターンの継続時間と変更方法についても若干述べたが、これらはいずれも実際の調査ならびに実験資料の分析をとおして、将来とも検討を加えてゆくべき事項である。また、信号制御は、一方通行規制、右左折禁止規制等の交通規制と一体化してはじめて、大きな制御効果を発揮できることを述べた。

今後の課題としては、交通損失の特性把握あるいは系統制御効果の検討のためにも、実際の街路における実験・調査をとおして、実証的研究を行なつてゆくべきこと、バスの発着あるいは歩行者等の原因で交通の流れが攪乱されやすい街路区間あるいは渋滞をきたしてしまつた区間における制御方式についても考察を加えること、本研究では、系統制御による配分交通量の変化は生じないことを前提としているが、その変化を考慮し、さらに交通量配分そのものを制御の中に組み入れた制御方式について、研究を行なつてゆくこと、信号機以外の手段をも考慮し、交通の迂回、待機の要素をとりいれた広域的観点からの制御についても考察を進めてゆくことなどが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) A.J.H. Clayton : Road Traffic Calculations, J. Instit. Civil Eng. 16, 247, 558, 1941
- 2) J.C. Tanner : A Problem of Interference Between Two Queues, Biometrika 40, 58, 1953
- 3) J. N. Darroch, G. F. Newell, and R. W. J. Morris : Queue for a Vehicle Actuated Traffic Light, Opns. Res. 12, 882, 1964
- 4) M. G. Grace, R. W. J. Morris and P. G. Pack-Poy : Some Aspects of Intersection Capacity and Traffic Signal Control by Computer Simulation, Second Conference Australian Road Research Board, 1964
- 5) M. C. Dunne and R. B. Potts : Analysis of a Computer Control of an Isolated Intersection, Proc. Third Internat. Symposium on the Theory of Traffic Flow, New York, June 21-23, 1965
- 6) M. C. Dunne : A Mathematical Investigation of the Control of Traffic at an Intersection, Ph. D. Thesis, University of Adelaide, 1966
- 7) M. C. Dunne : Traffic Delay at a Signalized Intersection with Binominal Arrivals, Transp. Sci. 1, 1967
- 8) J. C. Wardrop : Some Theoretical Aspects of Road Research, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part II 1(2), 325-62, 1952
- 9) M. Beckmann, C. B. McGuire, and C. B. Winsten : Studies in the Econometrics of Transportation, Yale University Press, 1956
- 10) G. F. Newell : Statistical Analysis of the Flow of Traffic

through a Signalized Intersection, *Q. Appl. Math.* 13, 353-369, 1956

- 11) F. V. Webster : Traffic Signal Settings, Road Research Laboratory, Road Research Technical Paper No. 39, 1958
- 12) T. Uematsu : On the Traffic Control of an Intersection Controlled by the Repeated Fixed-Cycle Traffic Light, *Ann. Inst. Statist. Math. (Tokyo)* 9, 87-107, 1958
- 13) M. J. Lighthill and G. B. Whitham : On Kinematic Waves II, A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, *Proc. Roy. Soc. (London)*, A 229, 317-345, 1955
- 14) J. Foster : A Study of Hydrodynamical Models of Road Capacity, *Aust. Road Res.* 3, 25, 1962
- 15) D. L. Gerlough : Some Problems in Intersection Traffic Control, pp 10~27, *Theory of Traffic Flow*, R. Herman (ed.), 1961
- 16) B. J. Lewis : Platoon Movement of Traffic from an Isolated Signalized Intersection, *Highway Research Board Bulletin* 178, 1958
- 17) E. P. Grabam and D. C. Chenu, A study of Unrestricted Platoon Movement of Traffic, *Traffic Eng.* 32, pp. 11~13, 1962
- 18) G. M. Pacey : Progress of a Bunch of Vehicles Released from a Traffic Signal, Road Research Laboratory, Report No. RN/2265, 1956
- 19) B. Helm : Saturation Flow of Traffic at Light-Controlled Intersections, *Traffic Eng.* 32, pp. 22~27, 1962

- 20) M.J. Grace and R.B. Potts : A Theory of the Diffusion of Traffic Platoons, *Opns. Res.* 12, 1964
- 21) G.F. Newell : The Flow of Highway Traffic through a Sequence of Synchronized Traffic Signals, *Opns. Res.* 8, 1960
- 22) G.F. Newell : Traffic Signal Synchronization for High Flows on a Two-way Street, ITTE Research Report No. 46, 1967
- 23) R.E. Allsop : An Analysis of Delays to Vehicle Platoons at Traffic Signals, IVth International Symposium on the Theory of Traffic Flow, 1968
- 24) R.E. Allsop : Sensitivity of Delay at a Fixed Time Traffic Signal to Small Errors in the Observations used for Calculating the Signal Settings, Vth International Symposium on Traffic Flow Theory and Transportation, 1971
- 25) C.W. Neill and T. T. Neil : patent 1723060 and 1703061 filed in July 1925 and awarded August 1929, U. S. Patent Office
- 26) Henry Watson : Street Traffic Flow, Chapman and Hall, London, 1933
- 27) J. T. Morgan and J. D. C. Little : Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth, *Opns. Res.* 12, 1964
- 28) 高田弘・栗本譲 : 系統信号方式による街路交通制御に関する一考察, 土木学会論文集 124号, 昭和40年12月
- 29) 越正毅 : 交通信号の路線系統化について, 道路, 昭和40年5月

- 30) D. C. Gazis and R. B. Potts : *The Over-Saturated Intersection, Proc. IInd International Symposium on the Theory of Traffic Flow, London, 1963*
- 31) E. Bararex and G. F. Newell : *Traffic Signal Synchronization on a One-Way Street, Transportation Science 1, 1967*
- 32) 尾崎・遠藤 : 交通流の解析, 機械試験所報告, 第54号, 1965年3月
- 33) 猪瀬・藤崎・浜田 : 道路交通管制, 電気学会誌, Vol. 86-11, No. 938, 1966
- 34) 猪瀬・藤崎・浜田 : 道路網における信号機群制御の方式, 電気学会誌, Vol. 87, No. 949, 1967
- 35) J. D. C. Little : *The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programing, Opns. Res. 14, 1966*
- 36) J. A. Hiller : *Appendix to Glasgow's Experiment in Area Traffic Control, Traffic Engng, and Control, 7(9), 1966*
- 37) R. E. Allsop : *Selection of Offsets to Minimize Delay to Traffic in a Network Controlled by Fixed-Time Signals, Transportation Science, 1967*
- 38) R. E. Allsop : *Choice of Offsets in Linking Traffic Signals, Traffic Engng. and Control, 1968-6*
- 39) N. Gartner : *Optimal Synchronization of Traffic Signal Networks by Dynamic Programming, Vth International Symposium on Traffic Flow Theory and Transportation, 1971-6*
- 40) A. Chang : *Synchronization of Traffic Signals in Grid Networks, IBM Journal, 1967-7*
- 41) D. I. Robertson : *TRANSYT, IVth International Symposium*

on Traffic Flow Theory, 1969

- 42) 越正毅：交通信号の系統制御オフセットパターンの一解法，土木学会論文報告集 147号，昭和42年11月
- 43) S. B. Millier and J. D. C. Little : Evaluation and Improvement of Traffic Signal Settings by Simulation, Transportation Science No. 170, 1967
- 44) R. Sagen : Traffic Simulation, IVth International Symposium on Traffic Flow Theory, 1969
- 45) W. F. Schaikwijk : Simulation of Traffic Flow through Large Traffic Nets, IVth International Symposium on Traffic Flow Theory, 1969
- 46) A. D. J. Crook : Effect on Accident of Area Traffic Control in West London, Traffic Engng. & Control, 12, No. 1, 1970-5
- 47) 伊沢朗：最適面制御方式の原理に関する研究，京都大学卒業論文，昭和45年3月
- 48) 佐佐木綱：交通流理論，技術書院，昭和40年4月
- 49) 浜田，林，猪瀬：通過帯を与える信号機制御方式のシミュレーションによる評価，交通工学，Vol. 3, No. 5, 昭和43年9月
- 50) L. T. Fan & C. S. Wang : The Discrete Maximum Principle, John-Wiley & Sons, Inc., New York, 1964
- 51) S. Katz : A Discrete Version of Pontryagin's Maximum Principle, J. Electronics and Control, Vol. 13, No. 2, 1962-8
- 52) 宇野利雄，菊池豊彦：最大原理入門，共立全書 165, 昭和43年
- 53) 奥谷巖：路線系統制御方式の決定手法，交通工学，Vol. 4,

No. 5, 1969-9

- 54) C. Berge : *THE THEORY OF GRAPHS*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1962
- 55) 奥谷巖 : 面制御に関する基礎的考察, 交通工学 第3巻, 1968, 7月
Iwao OKutani : Determination of Loss - Minimizing Offsets Pattern through the Maximum Principle, Proc. of JSCE, No. 174, 1970-2
- 57) 奥谷巖 : 街路網のオフセットパターンの決定方法に関する一提案, 道路, 1970-7
- 58) 米谷栄二, 奥谷巖 : 街路網の信号制御最適化手法の比較, 第10回日本道路会議論文集, 1971-10
- 59) 奥谷巖 : 街路網における交通信号制御の効果に関する一考察, 交通科学, Vol. 2, No. 1, 1971-6
- 60) H.N. Yagoda 他 : *The Design of Multiphase Intersection Signal System*, Traffic Engineering, 1970-4
- 61) S. Yagili : *Linear Programming for Traffic Light Optimization*, IBM Corp. Technical Publication Dept., 112 E
- 62) 大阪都心部広域交通制御システム委員会 : 大阪都心部広域交通制御調査報告書, 昭和45年3月
- 63) 佐佐木綱, 明神証 : 都市高速道路網における流入車制御理論, 交通工学, Vol. 3, No. 3, 1968-5